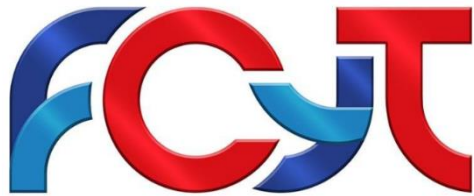




USEFX®



FACULTAD DE
CIENCIAS Y TECNOLOGÍA
UMRPSFXCH



Comité Editorial

Palma Moreno-María Elena, PhD
Director Revista

Palma Moreno-María Elena, PhD
Editora

Gonzales Ortiz –Carlos Fernando, Ing.
Traducción

Mendez Ramos-Rosbeli Alizol, Ing.
Diseño, Maquetación

Mendez Ramos-Rosbeli Alizol, Ing.
Marcación electrónica

La **Revista Ingeniería Sostenible Ambiental** Volumen 2, Número 5, julio a diciembre de 2025, es una revista editada por la Carrera de Ingeniería Ambiental, Facultad de Ciencias y Tecnología de la Universidad Mayor, Real y Pontificia de San Francisco Xavier de Chuquisaca

Misión

Somos un medio de difusión de conocimiento científico multidisciplinario cuyo objetivo es promover y facilitar la transferencia de resultados de investigaciones académicas originales e inéditas, tanto locales como nacionales e internacionales. Nuestro enfoque está dirigido a las comunidades científicas relacionadas con la gestión de recursos naturales, los procesos de descontaminación ambiental, la gestión ambiental y energética.

Dirección: Calle Regimiento Campos 180,
Teléfono:591-464-53488, Web:

<https://revistas.usfx.bo/index.php/ingsostenibleambiental>
Correo electrónico:
revista.ambiental@usfx.bo

La revista fue instituida mediante la Resolución de Consejo de Carrera N°001/2023

Editora: Palma Moreno-María Elena

ISSN-Impreso:3080-6704

ISSN-Virtual:3080-6712

Las opiniones expresadas por los autores no necesariamente reflejan las de los editores de la publicación.

Comité Científico

Ayaviri Panozo - Alberto, PhD.
Universidad Mayor, Real y Pontificia de San Francisco Xavier de Chuquisaca – Bolivia

Arenas Martínez - René, PhD.
Universidad Autónoma Juan Misael Saracho – Bolivia

Guerrero Saldes - Lorna, PhD.
Universidad Técnica Federico Santa María-Chile

Hernandez Tapia – Silvana Maricruz, MsC.
Colegio de Ingenieros Químicos, Ambientales y Petroquímicos de Pichincha (Ecuador)

Lopez Ortiz - Albina, Lic.
Universidad de San Carlos – Guatemala (USAC)

Molina Baspineiro - Rolando, PhD.
Universidad Mayor, Real y Pontificia de San Francisco Xavier de Chuquisaca – Bolivia

Montero- Torres Julio, PhD.
Universidad Mayor, Real y Pontificia de San Francisco Xavier de Chuquisaca - Bolivia

Pino – Ana Laura, MsC.
Universidad Mayor, Real y Pontificia de San Francisco Xavier de Chuquisaca – Bolivia

Rodríguez Gonzales - Apolonia, PhD.
Universidad Mayor, Real y Pontificia de San Francisco Xavier de Chuquisaca – Bolivia

Comité Arbitral

*Universidad Mayor, Real y Pontificia de San
Francisco Xavier de Chuquisaca – Bolivia*

PMME, PhD.

RGA, PhD.

PPC, PhD.

DCLM, MsC.

CYW, Ing.

GOCF, Ing.

HSLI, Ing.

MRRA, Ing.

MSMC, Ing.

RZBA, Ing.

SMA, Ing.

TSM, Ing.

VPM, Ing.

Presentación

La Revista Ingeniería Sostenible Ambiental, es una revista que publica artículos originales en las áreas de la gestión de recursos naturales, procesos de descontaminación ambiental, gestión ambiental y energética. Es editada semestralmente por la Carrera de Ingeniería Ambiental, Facultad de Ciencias y Tecnología de la Universidad Mayor, Real y Pontificia de San Francisco Xavier de Chuquisaca.

El contenido de los artículos que aparecen en cada edición, expresan la opinión de los autores y no necesariamente de los editores.

El Volumen 2, Número 5 presenta los siguientes artículos: *Evaluación multicriterio del sitio óptimo para el emplazamiento y diseño de un relleno sanitario en el municipio de Padilla*, por QUIÑONEZ – Victor, con adscripción en la Mayor, Real y Pontificia de San Francisco Xavier de Chuquisaca, Facultad de Ciencias y Tecnología, Carrera de Ingeniería Ambiental; *Modelación de la dispersión de material particulado PM2.5 en la zona urbana del municipio de Sucre utilizando imágenes satelitales Sentinel-2A*, por ORTEGA – Marco, con adscripción en la Mayor, Real y Pontificia de San Francisco Xavier de Chuquisaca, Facultad de Ciencias y Tecnología, Carrera de Ingeniería Ambiental; *Evaluación de impacto ambiental de actividades mineras en la microcuenca de la comunidad de Siporo*, por LOPEZ - Vladimir, con adscripción en la Mayor, Real y Pontificia de San Francisco Xavier de Chuquisaca, Facultad de Ciencias y Tecnología, Carrera de Ingeniería Ambiental; *Tratamiento pasivo de drenaje neutro contaminado mediante biorreactor sulfato-reductor en minería no metálica*, por DÍAZ- Areli, con adscripción en la Mayor, Real y Pontificia de San Francisco Xavier de Chuquisaca, Facultad de Ciencias y Tecnología, Carrera de Ingeniería Ambiental; *Fabricación de ladrillos ecológicos con plásticos reciclables como alternativa sostenible en construcciones civiles*, por VILACAGUA - Joaquín con adscripción en la Mayor, Real y Pontificia de San Francisco Xavier de Chuquisaca, Facultad de Ciencias y Tecnología, Carrera de Ingeniería Ambiental.

Contenido

Artículo	Página
Evaluación multicriterio del sitio óptimo para el emplazamiento y diseño de un relleno sanitario en el municipio de Padilla Multi-criteria evaluation of the optimal site for the location and design of a sanitary landfill in the municipality of Padilla QUIÑONEZ – Victor	137 – 148
Modelación de la dispersión de material particulado PM2.5 en la zona urbana del municipio de Sucre utilizando imágenes satelitales Sentinel-2A. Modeling the dispersion of PM2.5 particulate matter in the urban area of the municipality of Sucre using Sentinel-2A satellite imagery. ORTEGA – Marco	149 – 156
Evaluación de impacto ambiental de actividades mineras en la microcuenca de la comunidad de Siporo Environmental impact assessment of mining activities in the micro-basin of the Siporo community LOPEZ – Vladimir	157 – 164
Tratamiento pasivo de drenaje neutro contaminado mediante biorreactor sulfato-reductor en minería no metálica Passive treatment of contaminated neutral drainage using sulfate-reducing bioreactor in non-metallic mining DÍAZ– Areli	165 – 170
Fabricación de ladrillos ecológicos con plásticos reciclables como alternativa sostenible en construcciones civiles Manufacturing ecological bricks with recyclable plastics as a sustainable alternative in civil construction VILACAGUA - Joaquin	171 – 178
Instrucciones para Autores	

Evaluación multicriterio del sitio óptimo para el emplazamiento y diseño de un relleno sanitario en el municipio de Padilla

Multi-criteria evaluation of the optimal site for the location and design of a sanitary landfill in the municipality of Padilla

QUIÑONEZ- Victor¹

¹Universidad Mayor Real y Pontificia de San Francisco Xavier de Chuquisaca, Carrera de Ingeniería Ambiental.

Recibido septiembre, 04, 2025; Aceptado noviembre, 20, 2025

Resumen

El trabajo de investigación surge ante la necesidad de mejorar la gestión de residuos sólidos en el municipio de Padilla, donde la falta de infraestructura adecuada para la disposición final ha generado impactos ambientales y sanitarios significativos. Frente a este problema, se plantea una solución técnica sostenible que permita sustituir el botadero a cielo abierto por un sistema de manejo controlado, en cumplimiento con la normativa boliviana y orientado a la protección del medio ambiente y la salud pública.

El objetivo principal es determinar el sitio óptimo para el emplazamiento y diseñar un relleno sanitario adaptado a las condiciones locales. Para ello, la metodología integra un diagnóstico ambiental y la aplicación de sistemas de información geográfica, empleando un análisis multicriterio basado en criterios como pendientes, hidrografía, uso de suelo, accesibilidad, estabilidad del terreno y restricciones legales.

Posteriormente, se desarrolla el diseño técnico considerando la generación de residuos, la vida útil proyectada, la geometría de celdas, el sistema de lixiviados mediante el método suizo, la captación de biogás y las obras complementarias necesarias. Los resultados muestran que Padilla generará 63.621 m³ de residuos en 20 años, lo que fundamenta el diseño de un relleno de 65.040 m³, con un margen de seguridad del 2,2 %, un tanque de lixiviados cercano a 300 m³ y ochenta sub-celdas, lo que hace diseño propuesto técnica y ambientalmente viable.

Palabras Clave

Residuos sólidos, sistemas de información geográfica, disposición final.

Abstract

This research project arises from the need to improve solid waste management in the municipality of Padilla, where the lack of adequate infrastructure for final disposal has led to significant environmental and health impacts. In response to this problem, a sustainable technical solution is proposed to replace the open-air dump with a controlled management system that complies with Bolivian regulations and is geared toward protecting the environment and public health.

The main objective is to determine the optimal site for the facility and to design a landfill adapted to local conditions. To this end, the methodology integrates an environmental assessment and the application of geographic information systems, employing a multi-criteria analysis based on factors such as slopes, hydrography, land use, accessibility, ground stability, and legal restrictions.

Subsequently, the technical design is developed, taking into account waste generation, projected service life, cell geometry, the leachate system using the Swiss method, biogas capture, and the necessary complementary works. The results show that Padilla will generate 63.621 m³ of waste over 20 years, which supports the design of a 65.040 m³ landfill with a safety margin of 2,2%, a leachate tank of approximately 300 m³, and eighty sub-cells, making the proposed design technically and environmentally viable.

Keywords

Solid waste, geographic information systems, final disposal

Citación: Quiñonez V. (2025). Evaluación multicriterio del sitio óptimo para el emplazamiento y diseño de un relleno sanitario en el municipio de Padilla. *Revista Ingeniería Sostenible Ambiental*, 2(5), 137-148

Introducción

La gestión inadecuada de residuos sólidos urbanos continúa siendo uno de los principales desafíos ambientales en América Latina, especialmente en municipios intermedios donde predominan los botaderos a cielo abierto, generando contaminación del suelo, agua y aire, además de riesgos sanitarios para la población (UNEP, 2021; World Bank, 2018). En Bolivia, más del 50 % de los municipios aún dispone sus residuos en sitios sin control técnico, situación que incrementa la vulnerabilidad ambiental y dificulta el cumplimiento de la normativa vigente en materia de salud pública y protección ambiental (MMAyA, 2021). En este contexto, el municipio de Padilla presenta un sistema de disposición final deficiente, lo que ha generado impactos ambientales acumulativos y la necesidad urgente de implementar infraestructura adecuada para el manejo de residuos.

La selección del sitio óptimo para el emplazamiento de un relleno sanitario requiere integrar criterios ambientales, técnicos y sociales, lo cual puede lograrse mediante herramientas de análisis espacial como los Sistemas de Información Geográfica (SIG), ampliamente utilizados para apoyar la toma de decisiones en proyectos de gestión de residuos y planificación territorial (MMAyA, 2012; OPS/OMS, 2020; World Bank, 2018). El análisis multicriterio dentro de entornos SIG permite evaluar simultáneamente variables como pendientes, hidrografía, accesibilidad, uso del suelo, estabilidad del terreno y restricciones legales, proporcionando una metodología transparente y replicable para la selección del sitio más adecuado, en concordancia con los criterios establecidos en la normativa boliviana para rellenos sanitarios (NB 757; NB 760; MMAyA, 2012).

Además de la selección del emplazamiento, el diseño técnico del relleno sanitario constituye un componente esencial para garantizar la sostenibilidad del sistema de disposición final. Lineamientos técnicos nacionales, como la *Guía para el diseño de rellenos sanitarios manuales y mecanizados* y la NB 760,

recomiendan el dimensionamiento adecuado de celdas y subceldas, el control y conducción de lixiviados incluyendo esquemas inspirados en el denominado método suizo, así como la captación y manejo del biogás para reducir riesgos ambientales y sanitarios (MMAyA, 2012; NB 760; OPS/OMS, 2020). Estas consideraciones son fundamentales en municipios como Padilla, donde la cantidad de residuos proyectada y las características geográficas requieren soluciones precisas y técnicamente justificadas.

En este marco, el presente estudio tiene como objetivo determinar el sitio óptimo para el emplazamiento de un relleno sanitario mediante herramientas SIG y desarrollar un diseño técnico que responda a las condiciones locales del municipio de Padilla. Este trabajo contribuye a fortalecer la planificación ambiental municipal y ofrece una alternativa sostenible frente a los impactos negativos generados por la mala disposición final de residuos sólidos.

Materiales y métodos

Materiales

Se utilizaron datos oficiales y cartografía temática de:

- GeoBolivia e IGM: Modelo digital de elevación (MDE), uso de suelo, geología, red hidrográfica, red vial, límites administrativos.
- Capas derivadas: vulnerabilidad hídrica, TWI (Topographic Wetness Index), VAS (Vulnerabilidad de aguas subterráneas) y precipitación.

Software empleado:

- ArcGIS Pro y QGIS, para geoprocesamiento y análisis multicriterio.
- Excel, para proyecciones poblacionales y generación de residuos.
- AutoCAD Civil 3D, para el esquema de diseño geométrico del relleno sanitario.

VARIABLES

- VARIABLES INDEPENDIENTES: Pendiente, uso de suelo, geología, vulnerabilidad hídrica, TWI, VAS, distancia a ríos, distancia a centros poblados, distancia a red vial y precipitación.
- VARIABLE DEPENDIENTE: Índice de aptitud territorial para emplazamiento del relleno sanitario.

Las variables se definieron según los criterios de localización y diseño establecidos en la NB 757, NB 760 y la Guía para el Diseño de Rellenos Sanitarios (MMAyA, 2012).

ANÁLISIS ESPACIAL Y MULTICRITERIO EN SIG

Máscaras de exclusión: Se eliminaron áreas no aptas de acuerdo con la NB 757 (áreas urbanas, cuerpos de agua, áreas protegidas, pendientes máximas, zonas de alta vulnerabilidad acuífera y geologías desfavorables).

Reclasificación de criterios: Cada capa fue reclasificada en rangos de aptitud (por ejemplo, no apto, poco apto, apto, muy apto) según tablas definidas en el proyecto, alineadas a la normativa y a la funcionalidad requerida para un relleno sanitario.

Método AHP y WLC: Se aplicó el Analytic Hierarchy Process (AHP) para obtener los pesos relativos de cada criterio. Luego, se integraron las capas mediante combinación lineal ponderada (WLC) en el entorno SIG, generando un mapa continuo de aptitud territorial, sin interpretar aún los resultados en esta sección.

ANÁLISIS TESA PARA LA SELECCIÓN FINAL

Como fase de apoyo a la decisión, se aplicó un Análisis TESA (Técnico–Económico–Social–Ambiental) a las alternativas identificadas en el SIG.

Técnica–ambiental: Estabilidad del terreno, vulnerabilidad hídrica, compatibilidad con la normativa.

Social: Proximidad a poblaciones, potencial de conflictos, aceptación local.

Económica: Accesibilidad y requerimientos de movimiento de tierra y obras complementarias.

El TESA permitió priorizar de manera estructurada el sitio más sostenible, integrando criterios cualitativos y cuantitativos.

METODOLOGÍA PARA EL DISEÑO TÉCNICO DEL RELLENO SANITARIO

El diseño técnico preliminar se basó en los lineamientos de la NB 760 y la Guía del MMAyA (2012), e incluyó:

Estimación de la generación de residuos: Uso de datos de población actual y proyección a 20 años. Aplicación de la producción per cápita medida para Padilla (kg/hab·día). Cálculo de generación diaria y anual para el horizonte de diseño.

Cálculo volumétrico y vida útil: Conversión de masa a volumen considerando densidad compactada. Determinación del volumen de diseño del relleno sanitario con un margen de seguridad.

Dimensionamiento geométrico: Definición del área requerida, altura de operación, taludes y bermas, división del relleno en sub-celdas operativas para mejorar compactación, cobertura y control.

Sistemas de control ambiental: Esquema de drenaje y conducción de lixiviados hacia un tanque de almacenamiento dimensionado según el caudal estimado y las condiciones climáticas. Diseño conceptual del sistema de captación de biogás y drenaje pluvial, en concordancia con NB 760 y la Guía MMAyA.

MÉTODOS ESTADÍSTICOS

Se aplicó estadística descriptiva para:

- Proyecciones poblacionales.
- Cálculo de generación de residuos.
- Estimación de volúmenes y vida útil.

RESULTADOS

DIAGNÓSTICO AMBIENTAL Y GENERACIÓN DE RESIDUOS

La caracterización realizada en el municipio de Padilla determinó una producción per cápita de 0,516 kg/hab·día.

Con base en la población urbana evaluada, la generación diaria fue de 862,64 kg/día, equivalente a 0,86 toneladas/día. La generación anual alcanzó 315,8 toneladas, y la proyección para el horizonte de diseño de 20 años estableció un volumen acumulado de 63.621 m³ de residuos compactados. Estos valores constituyeron la base para el dimensionamiento del cuerpo del relleno sanitario.

Análisis de aptitud territorial (SIG – AHP – WLC)

El análisis espacial integró variables clave (Tablas 1 y 2), incluyendo pendiente, hidrografía, accesibilidad vial, uso del suelo, geología, vulnerabilidad hídrica, distancia a centros poblados, TWI, VAS y precipitación, tal como se ilustra en las siguientes figuras. La reclasificación de capas raster y la ponderación derivada del Analytic Hierarchy Process (AHP) facilitan la generación de un mapa continuo de aptitud territorial para la selección de sitios óptimos.

Figura 2 Mapa de distancia a ríos

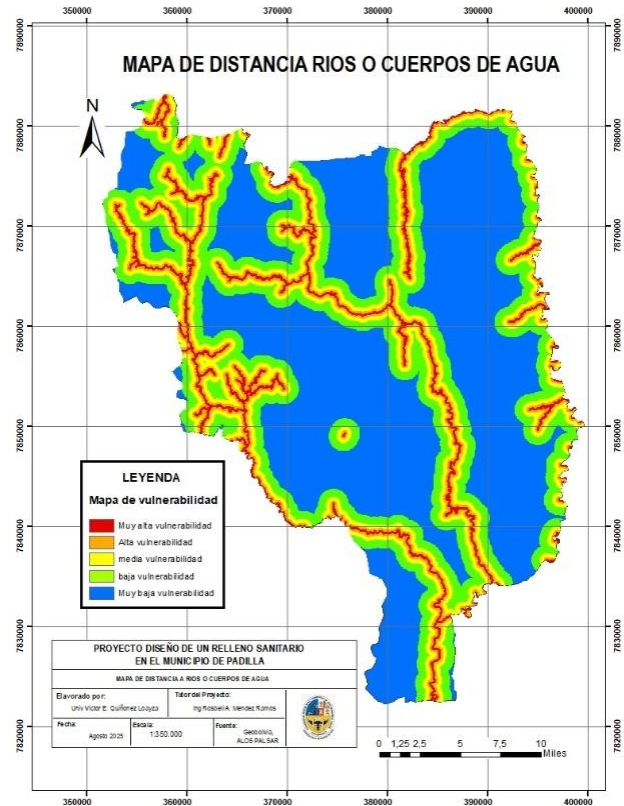


Figura 3 Mapa de pendiente

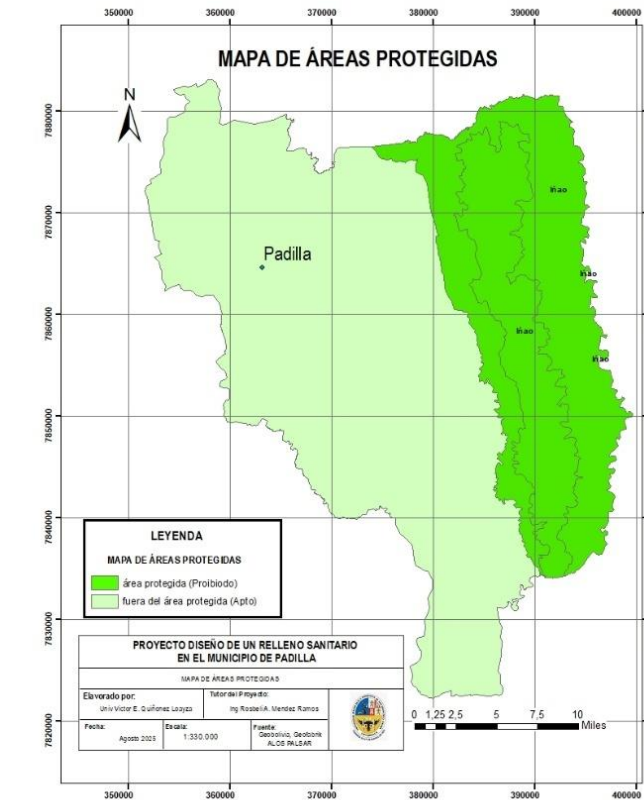
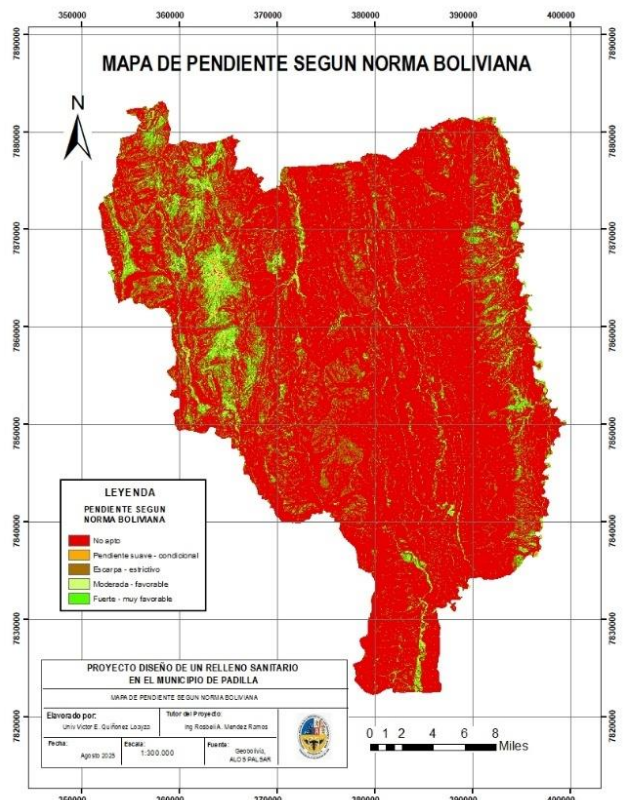


Figura 1 Mapa de áreas protegidas

Figura 4 Mapa de uso de suelo reclasificado

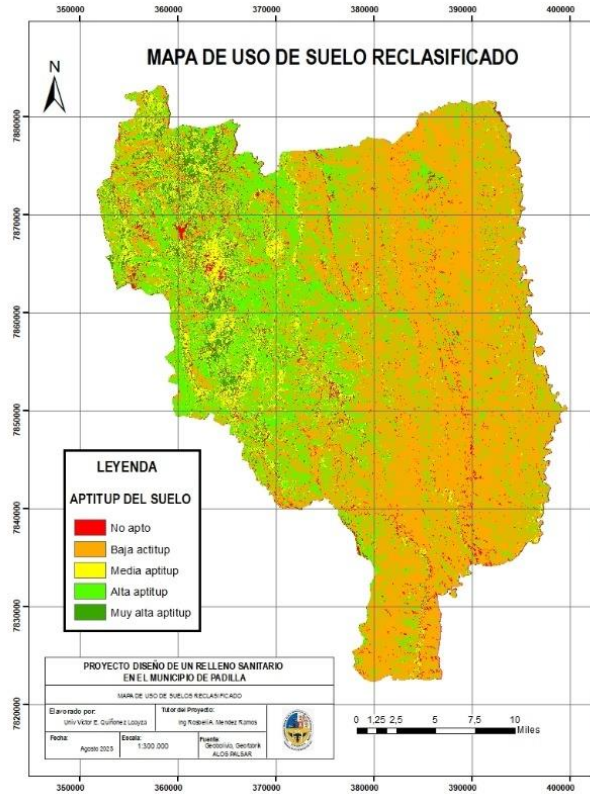


Figura 6 Vulnerabilidad hidrogeológica

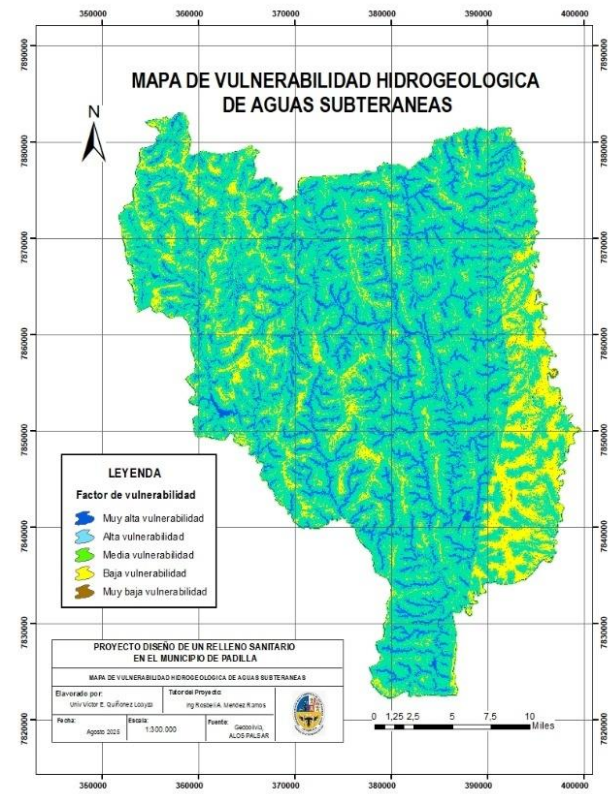


Figura 5 Mapa de índice topográfico de humedad

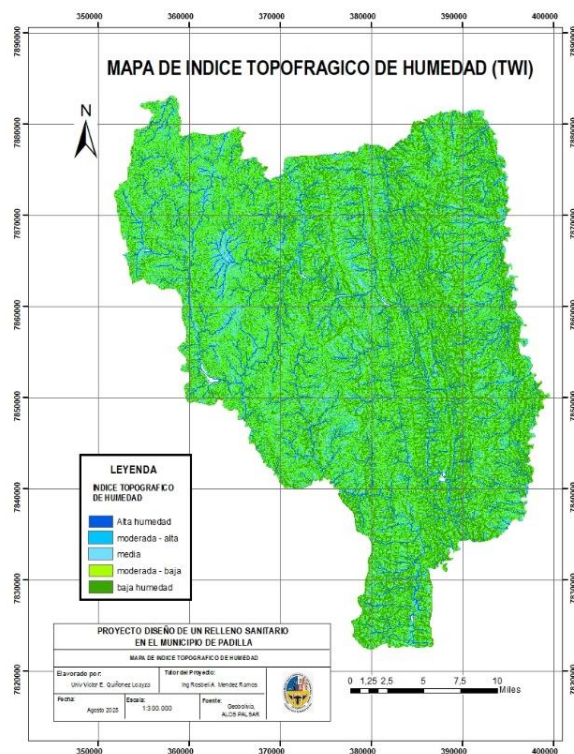


Figura 7 Mapa de Vulnerabilidad Geológica

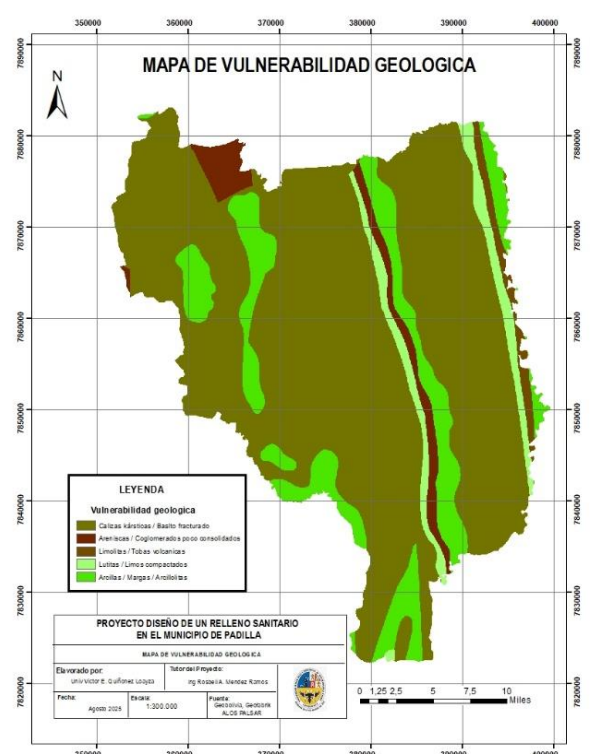


Figura 8 Mapa distancia a centros poblados

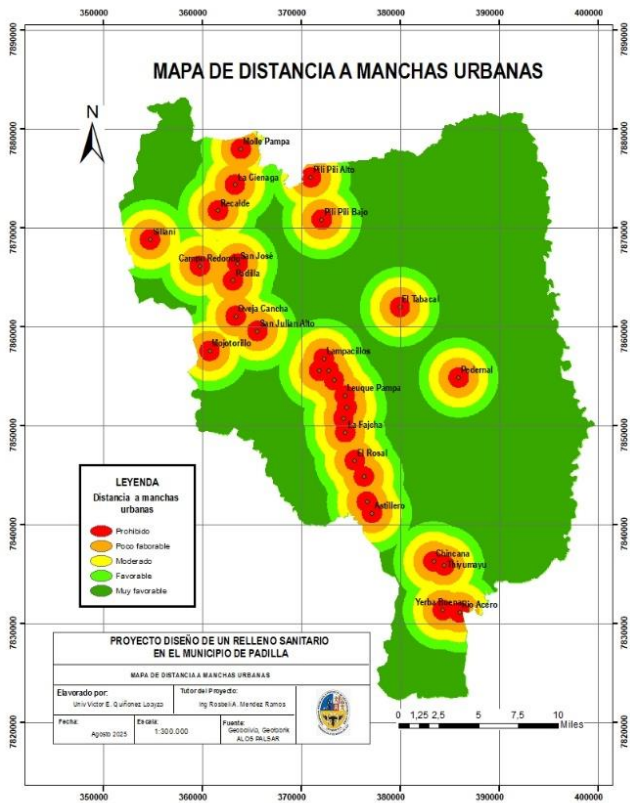


Figura 10 Mapa de precipitación

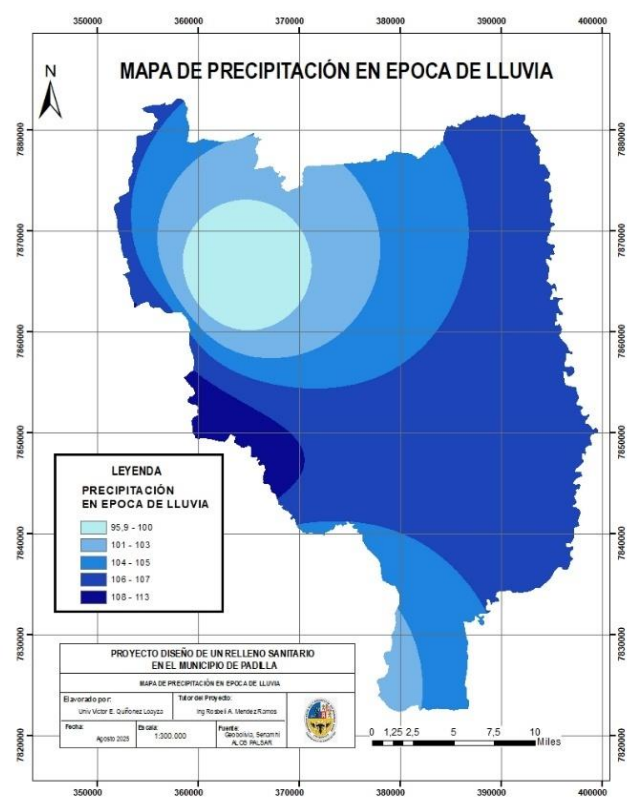


Figura 9 Mapa proximidad a Vías de acceso

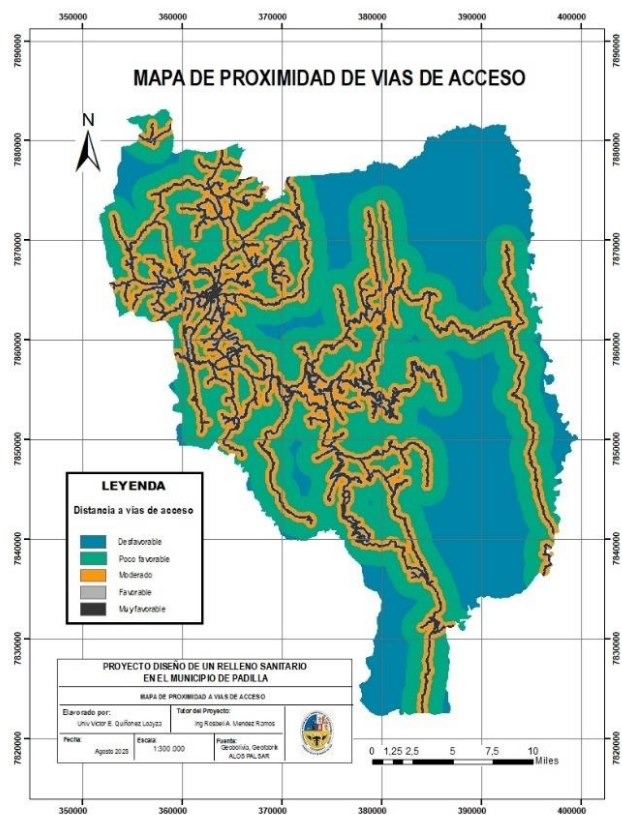


Figura 11 Mapa resultante de idoneidad

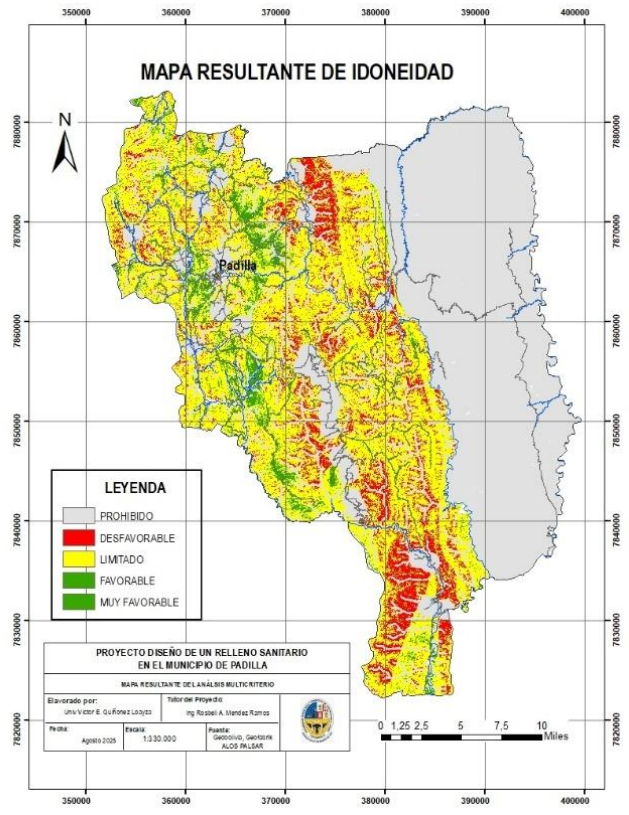


Figura 12 Mapa final

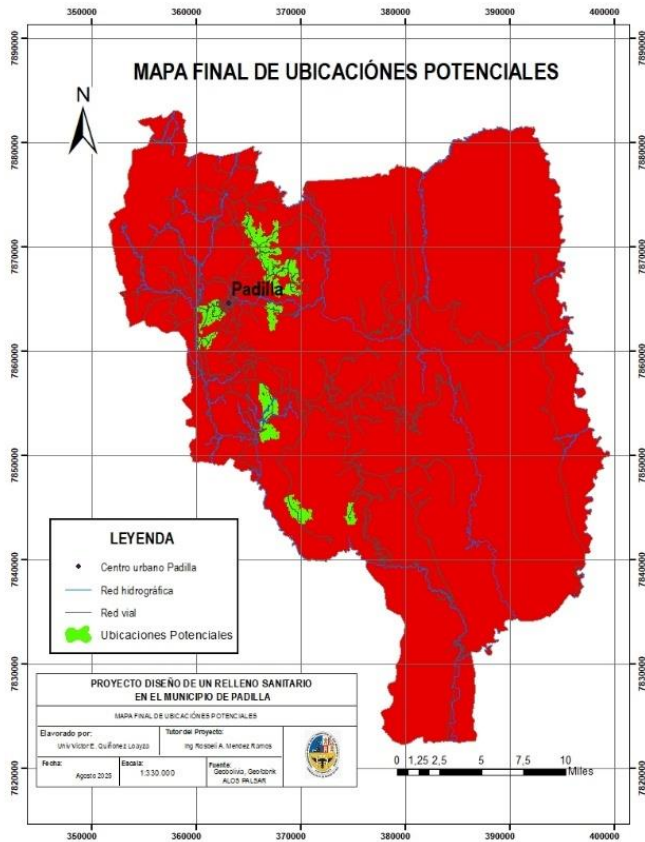


Figura 13 Lugares potenciales para el emplazamiento del relleno sanitario

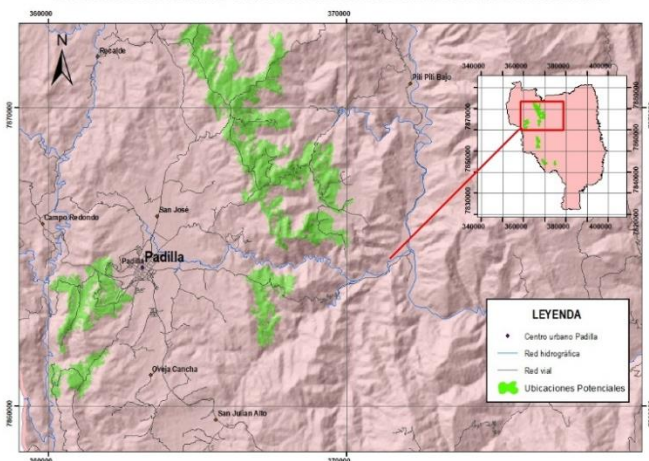


Figura 14 Ubicación de los 3 lugares propuestos

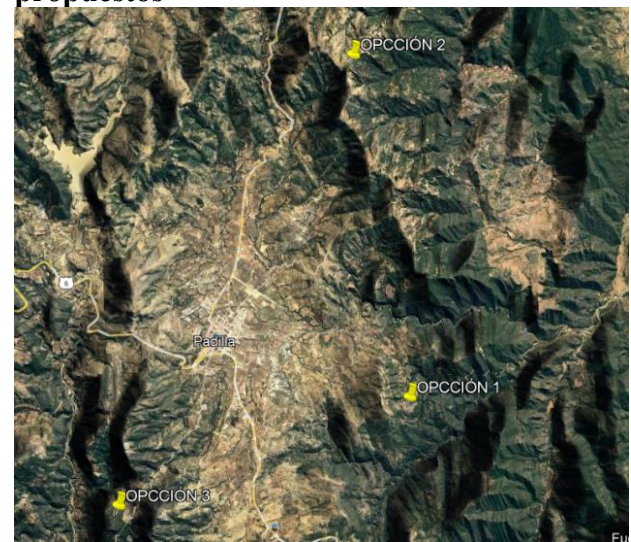


Tabla 1. Pesos AHP propuestos

Criterio	Peso	%
VAS (vulnerabilidad de acuífero)	0,20	20 %
Pendiente	0,15	15 %
Distancia a poblaciones	0,15	15 %
Distancia a ríos	0,15	15 %
Geología / Riesgo	0,10	10 %
TWI (humedad superficial)	0,09	9 %
Distancia a caminos	0,09	9 %
Uso de suelo	0,05	5 %
Precipitación	0,02	2 %
Total	1,00	100 %

El análisis multicriterio identificó tres alternativas principales (A-1, A-2 y A-3) como las áreas con mejores condiciones para el emplazamiento del relleno sanitario. Estas alternativas presentaron los valores más altos dentro de la escala de aptitud generada por el modelo.

Tabla 2. Criterios de localización según normativa internacional

Aspecto	Bolivia (NB 757, NB 760, Guía MMAyA)	OMS / Banco Mundial	Perú (MINAM, 2018)	Alemania (Directivas UE)
Distancia a centros poblados	≥ 1.000 m de la mancha urbana	Recomienda ≥ 500 – 1.000 m	≥ 1.000 m	≥ 500 m con barreras vegetales
Distancia a cuerpos de agua superficiales	≥ 500 m	≥ 500 m	≥ 500 m	≥ 300 m + sistemas de drenaje
Distancia a pozos y manantiales	≥ 500 m	≥ 500 m	≥ 1.000 m	≥ 300 m + monitoreo continuo
Zonas inundables	No permitido	No permitido	No permitido	No permitido
Áreas protegidas	Prohibido dentro de áreas protegidas	Prohibido	Prohibido	Prohibido
Geología y estabilidad	Evitar zonas de taludes inestables o dolinas	Evitar fallas activas	Evitar suelos no competentes	Estudios geotécnicos obligatorios
Hidrogeología	Tiempo de viaje de contaminante ≥ 150 años	Protección de acuíferos con barreras	Estudios hidrogeológicos obligatorios	Impermeabilización estricta + monitoreo
Nivel freático	$\geq 1,5$ m bajo fondo de celda	$\geq 1,5$ m	≥ 2 m	$\geq 1,5$ m
Accesibilidad vial	Acceso permanente a vías principales	Vías transitables todo el año	Vías afirmadas mín. 6 m de ancho	Acceso pavimentado obligatorio
Cobertura de material	Material de cobertura disponible localmente	Recomendado	Obligatorio	Obligatorio
Aspectos sociales	Considerar aceptación social	Participación comunitaria	Consulta ciudadana	Evaluación pública obligatoria

Evaluación TESA y selección del sitio

Las alternativas fueron evaluadas mediante la matriz Técnico–Económico–Social Ambiental (TESA). Los puntajes obtenidos fueron:

- A-1: 416 puntos
- A-2: 424 puntos
- A-3: 424 puntos

Las alternativas A-2 y A-3 alcanzaron el mayor índice de idoneidad (84,8 %).

Para resolver el empate, se consideraron criterios operativos adicionales. La alternativa A-3 presentó:

- Distancia de acarreo: 5,26 km
- Acceso vial directo: 12 m al camino principal

Estos factores permitieron seleccionar A-3 como el sitio óptimo para el emplazamiento del relleno sanitario del municipio de Padilla.

Dimensionamiento y diseño técnico preliminar

El área operativa requerida para la disposición final fue de 1,0604 ha, mientras que el área total necesaria, incluyendo zonas de protección y obras complementarias, alcanzó 1,33 ha. El relleno fue diseñado con una altura total de 6 m, distribuida en 3 m de trinchera y 3 m sobre rasante, con taludes de 1V:1H en trinchera y 1V:3H sobre rasante. Se definieron 80 subceldas operativas, lo que permite un manejo controlado y progresivo del volumen de residuos. El cálculo volumétrico determinó un volumen proyectado de 63.621 m³, para el cual se estableció un volumen de diseño de 65.040 m³, otorgando un margen de seguridad del 2,2 %.

Sistema de manejo de lixiviados

El diseño hidráulico del sistema se desarrolló mediante el método suizo. Se definieron:

- Pendiente de fondo: 1,5 %
- Separación entre drenes: 30 m
- Diámetro de drenes laterales: 160 mm
- Diámetro del dren colector: 200 mm
- Capa drenante: grava de 19–38 mm y espesor de 0,30 m
- Geosintéticos: geomembrana de HDPE \geq 1,5 mm

Con los parámetros de infiltración efectiva y la precipitación del mes crítico, se dimensionó un tanque de almacenamiento de lixiviados de aproximadamente 300 m³.

Discusión

La producción per cápita estimada de 0,516 kg/hab·día y el volumen proyectado de 63.621 m³ en 20 años se ubican dentro de los rangos reportados para municipios intermedios de países en desarrollo, lo que confirma la validez del diagnóstico realizado para Padilla y asegura su comparabilidad con estudios internacionales (World Bank, 2018; UNEP, 2021). Estos resultados evidencian la urgencia de sustituir el botadero a cielo abierto por un sistema de disposición controlada, en línea con las tendencias globales hacia una gestión más segura y sostenible de los residuos sólidos.

La aplicación de Sistemas de Información Geográfica (SIG) combinada con análisis multicriterio permitió identificar sitios potenciales que cumplen con criterios ambientales, técnicos y sociales, en concordancia con la Guía para el Diseño de Rellenos Sanitarios y la normativa NB 757 (MMAyA, 2012; NB 757). La integración del análisis TESA aportó una dimensión adicional al incorporar aspectos operativos y económicos, fortaleciendo la selección final y alineándose con enfoques contemporáneos de planificación de infraestructura sanitaria promovidos por organismos internacionales (OPS/OMS, 2020).

El diseño técnico propuesto, con un volumen de 65.040 m³, un margen de seguridad del 2,2 %, subdivisión en subceldas y un sistema de manejo de lixiviados basado en el método suizo, cumple con los criterios establecidos en la NB 760 y las guías nacionales (NB 760; MMAyA, 2012). Esto demuestra que el proyecto es técnica y ambientalmente viable, y que responde a estándares reconocidos de ingeniería.

Como proyección futura, se recomienda complementar el diseño con evaluaciones específicas de potencial de generación de biogás y análisis detallados de costos de operación y mantenimiento, lo que permitirá optimizar la gestión integral del relleno sanitario y avanzar hacia esquemas de economía circular y aprovechamiento energético de residuos.

Conclusiones

El estudio permitió identificar un sitio óptimo para el emplazamiento del relleno sanitario mediante la integración de herramientas SIG, análisis multicriterio y evaluación TESA, demostrando que la combinación de metodologías espaciales y criterios de sostenibilidad constituye una estrategia eficaz para mejorar la calidad de la toma de decisiones en la planificación de infraestructura ambiental. Este enfoque garantizó la selección de un área que satisface de manera simultánea criterios ambientales, técnicos, sociales y operativos, en concordancia con la normativa boliviana vigente.

El diseño técnico desarrollado asegura la viabilidad del sistema de disposición final, al incorporar estándares de ingeniería establecidos en la NB 760 y en la Guía de Diseño del MMAyA. La subdivisión en subceldas, el manejo controlado de lixiviados y la configuración geométrica propuesta fortalecen la sostenibilidad operativa del proyecto y reducen los riesgos asociados a la gestión de residuos sólidos urbanos.

En conjunto, la investigación evidencia que los municipios intermedios pueden optimizar sus procesos de planificación y gestión de residuos mediante la aplicación de metodologías geoespaciales y criterios de sostenibilidad. Como línea de trabajo futuro, se recomienda profundizar en el análisis de costos de operación, emisiones de biogás y comportamiento hidrológico del sitio, con el fin de complementar la gestión integral del relleno sanitario y avanzar hacia modelos más eficientes, resilientes y alineados con los principios de la economía circular.

Referencias

- Agencia de Residuos de Cataluña (ARC). (1997). *Decreto 7/1997 de enero, sobre la disposición de los desperdicios de los residuos en depósitos controlados*. Catalunya.
- Agencia de Residuos de Cataluña (ARC). (n.d.). *Cierre técnico del relleno de Serrallarga, Lleida; Catalunya, España* (Mencionado en Guía MMAyA).
- Agencia Sueca de Cooperación Internacional (ASDI). (2023). *Lecciones aprendidas y buenas prácticas en los municipios de Boyuibe, Cuevo y Lagunillas del Chaco Cruceño: Cierre Técnico y Rehabilitación de Botaderos* (S. M. Morales Reider & H. Cari Ruiz, Autores).
- Banco Mundial. (1999). Documento de trabajo 426 (P. Rushbrook & M. Pugh, Autores).
- Banco Mundial. (2021). *What a Waste Global Database*. Recuperado de <https://datacatalog.worldbank.org/dataset/what-waste-global-database>
- Castro Merizalde, B. (1993). *Manual Programa de Computo HELP-2.5*.
- Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL). (2021). *Economía circular en América Latina y el Caribe: oportunidad para una recuperación transformadora* (Documentos de Proyectos LC/TS.2021/120). Naciones Unidas. www.cepal.org/es/publications ([cepal.org](https://www.bing.com) in [Bing](https://www.bing.com))
- Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (CEPIS). (n.d.). *Guía para el diseño, construcción y operación de rellenos sanitarios manuales*.
- Chow, V. T., Maidment, D. R., & Mays, L. W. (1988). *Applied hydrology*. McGraw-Hill.

- Colomer, F., & Gallardo, A. (2007). *Tratamiento y Gestión de Residuos Sólidos*. Universidad Politécnica de Valencia, España.
- Daniel, D. E., & Koerner, R. M. (2007). *Waste containment facilities: Guidance for construction, testing, and approval*. ASCE.
- Duncan, J. M., Wright, S. G., & Brandon, T. L. (2014). *Soil strength and slope stability (2nd ed.)*. Wiley.
- Educa Padilla-Tomina. (n.d.). [Cultivos de Padilla]. Recuperado de https://www.google.com/url?sa=i&url=https://www.3A%2F%2Fwww.educa.com.bo%2Fgeografia%2Fpadilla-municipio-tomina&psig=AOvVaw1T6elwz-gcvKGc-dRqxI4r&ust=1757630793170000&source=images&cd=vfe&opi=89978449&ved=0CBUQjRxqFwoTCJCv_IyJz48DFQAAAAAdAAAAABAE
- Environmental Protection Agency (EPA). (1998). *Guidance for landfilling waste in economically developing countries*.
- Espinosa Lloréns, M. (2010). Análisis del comportamiento de los lixiviados generados en un vertedero de residuos sólidos municipales de la ciudad de la Habana. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 26(4), México.
- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura). (1976).
- Fernández, A., & Sánchez, O. (1997). *Guía para la gestión integral de los residuos sólidos urbanos*. ONUDI – LARE.
- Giraldo, E. (2008). Tratamiento de lixiviados de rellenos sanitarios: Avances Recientes. Universidad de los Andes.
- Gobierno Autónomo Departamental de Chuquisaca (GADCH). (2020). *Datos de producción agrícola*.
- Gonçalves Ferreira, A. (2010). *Estudo dos Lixiviados Das Frações do Aterro Sanitário...*
- Helvetas Swiss Intercooperation. (2020). *Diagnósticos Territoriales de Cuevo, Boyuibe y Lagunillas*.
- Helvetas Swiss Intercooperation. (s/a). *Planes de Cierre y Rehabilitación de los Botaderos a Cielo Abierto de Cuevo, Boyuibe y Lagunillas*.
- Henry, J. G., & Heinke, G. W. (1996). *Ingeniería Ambiental (2a ed.)*. Editorial Pearson.
- Instituto Boliviano de Normalización y Calidad (IBNORCA). (1996). *Norma Boliviana NB 743: Residuos sólidos – Determinación de parámetros de diseño sobre residuos sólidos municipales*. La Paz: Autor. <https://bibliotecas.ucb.edu.bo/cgi-bin/koha/opac-detail.pl?biblionumber=128464>
- Instituto Boliviano de Normalización y Calidad (IBNORCA). (1996). *Norma Boliviana NB 757: Características que deben reunir los sitios para ubicar sistemas de disposición final de residuos sólidos municipales*.
- Instituto Boliviano de Normalización y Calidad (IBNORCA). (1996). *Norma Boliviana NB 760: Requisitos para el diseño, construcción, operación y monitoreo de un relleno sanitario*.
- Instituto Boliviano de Normalización y Calidad (IBNORCA). (2012). *Norma Boliviana NB-69019: Residuos sólidos – Residuos de aparatos eléctricos y/o electrónicos – Manejo de residuos de aparatos eléctricos y/o electrónicos*. La Paz. <https://www.ibnorca.org/tienda/catalogo/detalle-norma/nb-69019:2012-nid=2779-6#scrollSlider>

- Jaramillo, J. (2002). *Guía para el Diseño, Construcción y Operación de Rellenos Sanitarios Manuales*. Universidad de Antioquía, Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente, Colombia.
- Ley N° 031 Ley Marco de Autonomías Andrés Ibáñez. (2011). *Gaceta Oficial de Bolivia*.
- Ley N° 300 Ley Marco de la Madre Tierra Desarrollo Integral para Vivir Bien. (2012). *Gaceta Oficial de Bolivia*.
- Ley N° 755 de Gestión Integral de Residuos. (2015). *Gaceta Oficial del Estado Plurinacional de Bolivia*.
- Ley N° 777 del Sistema de Planificación Integral del Estado – SPIE. (2016). *Gaceta Oficial de Bolivia*.
- Martínez Guerrero, R. (2007). *Estudio sobre la concentración de contaminantes orgánicos, inorgánicos y biológicos en lixiviados del relleno sanitario “San Nicolás” y en agua de pozos aledaños*. México.
- Meléndez, C. (2004). *Guía Práctica para la Operación de Celdas Diarias en Relleno Sanitarios Pequeños y Mediados*. PROARCA/SIGMA Argentina.
- Ministerio de Ambiente (Colombia). (2002). *Guía ambiental para el saneamiento y cierre de botaderos a cielo abierto*.
- Ministerio de Medio Ambiente y Agua (MMAyA). (2011). *Diagnóstico de la Gestión de Residuos Sólidos en Bolivia*.
- Ministerio de Medio Ambiente y Agua (MMAyA). (2011). *Programa Plurinacional de la Gestión Integral de Residuos Sólidos*.
- Ministerio de Medio Ambiente y Agua (MMAyA). (2014). *Guía para el Diseño, Construcción, Operación, y Cierre de Rellenos Sanitarios* (Aprobada mediante R.M. 398 del 29 de septiembre de 2014).
- Ministerio de Medio Ambiente y Agua (MMAyA). (2016). Decreto Supremo N° 2954 (Reglamento General de la Ley N° 755). *Gaceta Oficial de Bolivia*. Recuperado de <https://www.lexivox.org/norms/BO-RE-DSN2954.html>
- Ministerio de Medio Ambiente y Agua (MMAyA). (2016). *Plan de Implementación de la Ley N° 755* (Aprobado mediante R.M. N° 489/2016).
- Ministerio de Medio Ambiente y Agua (MMAyA). (2021). *Planificación Nacional para el Cierre Técnico de Botaderos* (R.M. 269/2021 del 18 de mayo de 2021).
- Ministerio de Medio Ambiente y Agua (MMAyA). (2022). *Guía para el fortalecimiento e Inclusión Social de Recicladoras y Recicladores* (Aprobado mediante R.M. 170 del 06 de mayo de 2022).
- NB 757. (IBNORCA). *Residuos sólidos. Relleno sanitario. Requisitos para la selección del sitio*.
- NB 760. (IBNORCA). *Residuos sólidos. Relleno sanitario. Requisitos para el diseño, construcción, operación y clausura*.
- OPS/OMS. (2020). *Gestión integral de residuos sólidos y riesgos sanitarios en la región de las Américas*. Organización Panamericana de la Salud.
- UNEP. (2021). *Waste Management Outlook for Latin America and the Caribbean*. United Nations Environment Programme.
- World Bank. (2018). *What a Waste 2.0: A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050*. The World Bank.

Modelación de la dispersión de material particulado PM2.5 en la zona urbana del municipio de Sucre utilizando imágenes satelitales Sentinel-2A.

Modeling the dispersion of PM2.5 particulate matter in the urban area of the municipality of Sucre using Sentinel-2A satellite imagery.

ORTEGA- Marco¹

¹Universidad Mayor Real y Pontificia de San Francisco Xavier de Chuquisaca, Carrera de Ingeniería Ambiental.

Recibido marzo, 2025; Aceptado mayo, 16, 2025

Resumen

El aumento del parque automotor y de las actividades urbanas en la ciudad de Sucre ha incrementado las emisiones de material particulado (PM2.5), lo que afecta a la calidad del aire y a la salud pública. El presente estudio propone y valida una metodología para estimar la distribución espacial del PM2.5 en el área urbana de Sucre entre 2023 y 2024, a partir de imágenes Sentinel-2A (con un máximo del 10 % de nubosidad) corregidas atmosféricamente mediante FLAASH y datos in situ de la Red MoniCA. Para desarrollar modelos de regresión lineal múltiple, se utilizaron reflectancias de las bandas B2, B4, B8 y B12, emparejadas con promedios horarios de estaciones automáticas. El modelo seleccionado presentó un buen rendimiento estadístico ($R^2 = 0,92$; $RMSE = 4,10$) y se validó con estaciones de referencia. La cartografía generada puso de manifiesto niveles de riesgo medio en sectores de los distritos 1 y 2, principalmente asociados a la congestión del tráfico y a las condiciones meteorológicas de la temporada de lluvias. La metodología implementada en ENVI 5.3 y RStudio constituye una herramienta útil y reproducible para la gestión medioambiental urbana.

Palabras Clave Regresión lineal múltiple; teledetección; calidad del aire.

Abstract

The growth of the vehicle fleet and urban activities in the city of Sucre has led to an increase in particulate matter (PM2.5) emissions, which affects air quality and public health. This study proposes and validates a methodology for estimating the spatial distribution of PM2.5 in the urban area of Sucre between 2023 and 2024, based on Sentinel-2A images (with a maximum of 10% cloud cover) atmospherically corrected using FLAASH and in situ data from the MoniCA Network. To develop multiple linear regression models, reflectance values from bands B2, B4, B8, and B12 were used, paired with hourly averages from automatic monitoring stations. The selected model demonstrated good statistical performance ($R^2 = 0,92$; $RMSE = 4,10$) and was validated using reference stations. The generated maps revealed moderate risk levels in parts of Districts 1 and 2, primarily associated with traffic congestion and weather conditions during the rainy season. The methodology implemented in ENVI 5.3 and RStudio constitutes a useful and reproducible tool for urban environmental management.

Keywords

Multiple linear regression; remote sensing; air quality.

Citación: Ortega M. (2025). Modelación de la dispersión de material particulado PM2.5 en la zona urbana del municipio de Sucre utilizando imágenes satelitales Sentinel-2A. *Revista Ingeniería Sostenible Ambiental*, 2(5), 149-156

Introducción

La contaminación atmosférica representa uno de los principales problemas ambientales y de salud pública a escala global, especialmente en áreas urbanas donde el crecimiento demográfico, el incremento del parque automotor y las actividades antrópicas intensifican las emisiones contaminantes.(Mozafari et al.,2019). Entre los contaminantes más perjudiciales se encuentra el material particulado fino (PM_{2.5}), cuyas partículas, con diámetros aerodinámicos menores a 2,5 µm, pueden penetrar profundamente en el sistema respiratorio, alcanzando los alvéolos pulmonares y generando enfermedades respiratorias, cardiovasculares y un aumento en la mortalidad prematura (Castro et al., 2010.).

La Organización Mundial de la Salud actualizó en 2021 sus Guías de Calidad del Aire, recomendando un límite promedio anual de 5 µg/m³ y un valor diario de 15 µg/m³ para PM_{2.5}, con el fin de reducir los riesgos para la salud humana (WHO, 2021). Sin embargo, en muchos países en desarrollo, el monitoreo continuo de este contaminante se ve limitado por la baja densidad de estaciones terrestres, la discontinuidad de los registros y los altos costos operativos, lo que dificulta la evaluación espacial y temporal de la calidad del aire (C. Guo et al., 2018).

Recientemente, el uso del sensor Sentinel-2 ha cobrado relevancia en estudios urbanos debido a su alta resolución espacial (10-20 m), que permite capturar la heterogeneidad de las emisiones contaminantes en entornos urbanos con mayor detalle que los sensores de resolución media, como MODIS o Landsat (Drusch et al., 2012).

Investigaciones previas han demostrado que determinadas bandas espectrales de Sentinel-2 pueden utilizarse eficazmente para estimar aerosoles y material particulado, alcanzando altos niveles de ajuste estadístico cuando se integran con datos de monitorización en superficie (Jiang et al., 2023).

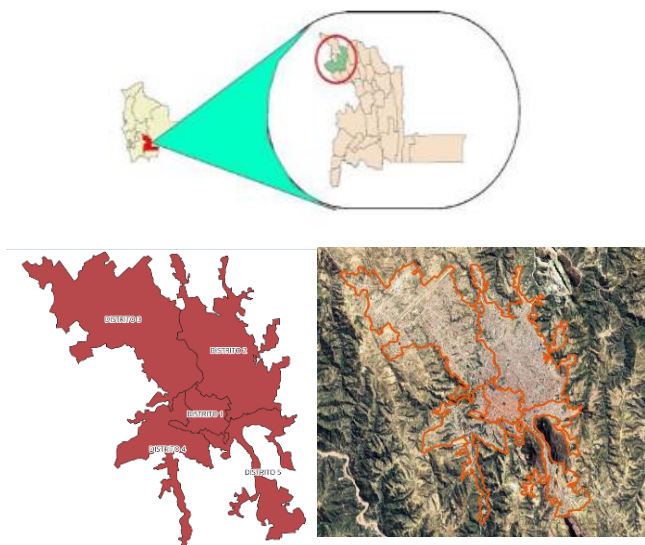
En el municipio de Sucre (Bolivia), los estudios sobre contaminación atmosférica mediante teledetección son limitados y se han centrado principalmente en estimar el PM₁₀ con imágenes Landsat, mostrando correlaciones significativas entre reflectancias espectrales y concentraciones medidas in situ (Gómez, 2024). Sin embargo, hay un vacío de información sobre la modelización espacial del PM_{2.5} a escala urbana que utilice imágenes Sentinel-2 de alta resolución, lo que limita la identificación de zonas de riesgo y la formulación de estrategias de gestión ambiental locales(Y. Guo et al., 2014).Ante esta problemática, el objetivo de este estudio es modelar la dispersión del material particulado (PM_{2.5}) en la zona urbana del municipio de Sucre entre 2023 y 2024 mediante el procesamiento de imágenes satelitales Sentinel-2A e integrarlas con los datos de las estaciones automáticas de la Red MoniCA. Para ello, se desarrollaron modelos de regresión lineal múltiple basados en reflectancias espectrales que permitieron estimar y cartografiar la distribución espacial del contaminante. Los resultados obtenidos suponen una aportación metodológica importante para el seguimiento de la calidad del aire en ciudades intermedias y ofrecen información técnica que puede ayudar a la hora de tomar decisiones en materia de gestión ambiental y protección de la salud pública.

Materiales y métodos

Área de estudio

Sucre (S19°3'2" y O65°47'25") se encuentra localizado en la provincia Oropeza del departamento de Chuquisaca a una altura de 2750m.s.n.m. El área total es de 1.721,69km² que son distribuidas en 8 distritos de las cuales 5 son distritos urbanos, 3 son distritos rurales. Este municipio es el más poblado del departamento de Chuquisaca, representando un 45% de la población total. Limita al norte con Poroma, al sur con Yotala, al este con Tarabuco y al sudeste con Yamparaez. El clima predominante es templado subhúmedo, con una temperatura mínima media anual de 15°C y una máxima media de 22°C. En la ilustración adjunta se puede observar la ubicación del municipio de Sucre en la provincia Oropeza del departamento de Chuquisaca.

Figura 1 Ubicación geográfica de los 5 distritos urbanos de la Sucre con datos vectoriales de la secretaria de ordenamiento territorial del G. A. M. S. e imagen satelital de Google Earth Pro.



Mediciones de PM2.5 in situ

Las concentraciones de PM2.5 empleadas en la calibración y validación del modelo provienen de mediciones in situ realizadas por las estaciones automáticas de la Red MoniCA en la ciudad de Sucre durante el periodo 2023–2024. Se utilizaron registros diarios de las estaciones ubicadas en la avenida Marcelo Quiroga Santa Cruz, Yurac Yurac y la Terminal de Buses, los cuales fueron promediados temporalmente y sincronizados con las fechas de adquisición de las imágenes Sentinel-2A.

Imágenes sentinel 2A

El presente estudio se inició con la recopilación de imágenes satelitales Sentinel-2A correspondientes al periodo 2023-2024, con un máximo del 10 % de nubosidad sobre el área de estudio.

En total, se descargaron doce imágenes de la plataforma Copernicus Data Space Ecosystem y se utilizaron las bandas espectrales B2, B4, B8 y B12 para analizar y modelar la concentración de PM2.5.

Tabla 1. Características espectrales y espaciales de las bandas Sentinel 2A

Bandas	Longitud De Onda (μm)	Resolución (m)
Banda 1 - Aerosol	0,43 - 0,45	60
Banda 2 - Blue	0,45 - 0,52	10
Banda 3 - Green	0,54 - 0,57	10
Banda 4 - Red	0,65 - 0,68	10
Banda 5 - Red edge 1	0,69 - 0,71	20
Banda 6 - Red edge 2	0,73 - 0,74	20
Banda 7 - Red edge 3	0,77 - 0,79	20
Banda 8 - Near Infrared (NIR) 1	0,78 - 0,90	10
Banda 8A - Near Infrared (NIR) 2	0,85 - 0,87	20
Banda 9 - Water vapour	0,93 - 0,95	60
Banda 10 - Cirrus	1,36 - 1,39	60
Banda 12 - SWIR 2	2,10 - 2,28	20

Metodología para la estimación de PM2.5

Selección de imágenes satelitales: Se seleccionaron imágenes del satélite Sentinel-2A correspondientes al periodo 2023-2024, con un máximo del 10 % de nubosidad sobre el área de estudio. Dichas imágenes se descargaron de la plataforma Copernicus Data Space Ecosystem, teniendo en cuenta su adecuada resolución espacial (10-20 m) y temporal para el análisis urbano.

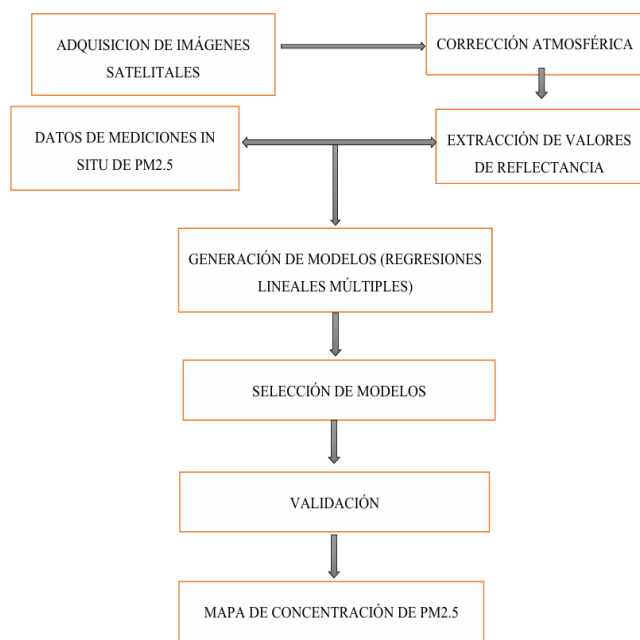
Preprocesamiento de las imágenes: El preprocesamiento consistió en corregir la atmósfera de las imágenes mediante el algoritmo FLAASH, implementado en el programa informático ENVI 5.3, con el objetivo de convertir los valores de radiancia en reflectancia de superficie y reducir los efectos atmosféricos.

Construcción de matrices de datos: Se crearon matrices integrando los valores de reflectancia de las bandas B2, B4, B8 y B12 con las concentraciones de PM_{2.5} obtenidas in situ por las estaciones automáticas de la Red MoniCA. Estas matrices fueron procesadas en el programa estadístico RStudio con el fin de desarrollar modelos de regresión lineal múltiple y obtener ecuaciones empíricas para la estimación de PM_{2.5}.

Validación de los resultados: Los modelos generados se evaluaron mediante indicadores estadísticos como el coeficiente de determinación (R^2), el error cuadrático medio (RMSE) y el criterio de información de Akaike (AIC). Además, se compararon los valores estimados por el modelo con las mediciones in situ para determinar la precisión y fiabilidad de la estimación.

Generación de mapas y análisis espacial: Por último, se aplicó el modelo seleccionado para generar mapas temáticos de la concentración de PM_{2.5} y analizar los patrones espaciales y temporales de su distribución en la zona urbana del municipio de Sucre.

Figura 2 Esquema Metodológico para la estimación del PM_{2.5}



Resultados

En el desarrollo de esta investigación se emplearon modelos derivados de la extracción de valores de reflectancia correspondientes a distintas bandas espectrales. Estos valores fueron organizados en una matriz de datos mediante Microsoft Excel y posteriormente exportados al entorno estadístico RStudio. En RStudio se aplicaron análisis basados en modelos de regresión lineal múltiple, con el propósito de identificar relaciones estadísticamente significativas entre las variables. Los modelos seleccionados, definidos por su mayor nivel de significancia, fueron procesados en el software ENVI 5.3, generando un mapa temático que representa tanto los niveles de concentración como los niveles de riesgo asociados a la exposición a partículas PM_{2.5}.

A partir de la matriz de datos correspondiente al período 2023-2024, se generaron doce modelos de regresión lineal múltiple con diferentes combinaciones de bandas espectrales de las imágenes Sentinel-2A. Estos modelos se evaluaron mediante el coeficiente de determinación (R^2), el error cuadrático medio (RMSE) y el criterio de información de Akaike (AIC). Este último es un indicador clave para seleccionar el modelo óptimo, ya que este criterio permite comparar modelos de distinta estructura, identificando aquel que describe de forma más adecuada la relación entre las bandas espectrales Sentinel-2A y las concentraciones de PM_{2.5} observadas.

Tabla 2 Modelos de regresión lineal múltiple generados en el software Rstudio con sus indicadores

Mod	R^2	RMSE	AIC	fecha
3	0.92	4.10	71.54233333	08/08/2023
9	0,8556	5,074	14.79155172	10/02/2024

Como se muestra en la tabla 2, se identificaron dos modelos con un mejor rendimiento estadístico, correspondientes a las fechas 8 de agosto de 2023

(modelo 3) y 10 de febrero de 2024 (modelo 9). El modelo 3 presentó el mejor ajuste global, con un R² de 0,92, un RMSE de 4,10 µg/m³ y un AIC de 71,54, lo que evidencia una alta capacidad predictiva y un menor error de estimación en comparación con los demás modelos generados.

Por tanto, el modelo 3 fue seleccionado para la espacialización de las concentraciones de PM2.5 en el área urbana del municipio de Sucre. Esta selección se fundamentó en la mayor concordancia observada entre los valores estimados por el modelo y las concentraciones registradas por las estaciones automáticas de la Red MoniCA, ubicadas en zonas de alto tráfico vehicular, particularmente en la Terminal de Autobuses y en la avenida Marcelo Quiroga Santa Cruz. El modelo seleccionado se expresa mediante la siguiente ecuación

$$PM2.5 = 0.054 * B2 - 0.039 * B4 + 0.041 * B8 + 0.022 * B12 + 11.36$$

Tabla 3 Comparación de valores estimados vs. valores de monitoreo de PM2.5 para la temporada seca y húmeda

Enero 2024				
Ubicación	PM2.5 Estimado (Modelo) (µg/m ³)	PM2.5 (Red MoniCA) (µg/m ³)	Error de validación	Error de validación promedio (%)
Av. Marcelo Quiroga Santa Cruz	21.56	17.87	3.69	
Agosto 2023				
Ubicación	PM2.5 Estimado (Modelo) (µg/m ³)	PM2.5 (Red MoniCA) (µg/m ³)	Error de validación	Error de validación promedio (%)
Av. Marcelo Quiroga Santa Cruz	38.75	31.54	7.21	
Yurac Yurac	44.12	18.74	25.38	19.33
Terminal de autobuses	46.13	30.72	15.41	

Figura 3 Distribución espacial de los niveles de PM2.5 agosto 2023

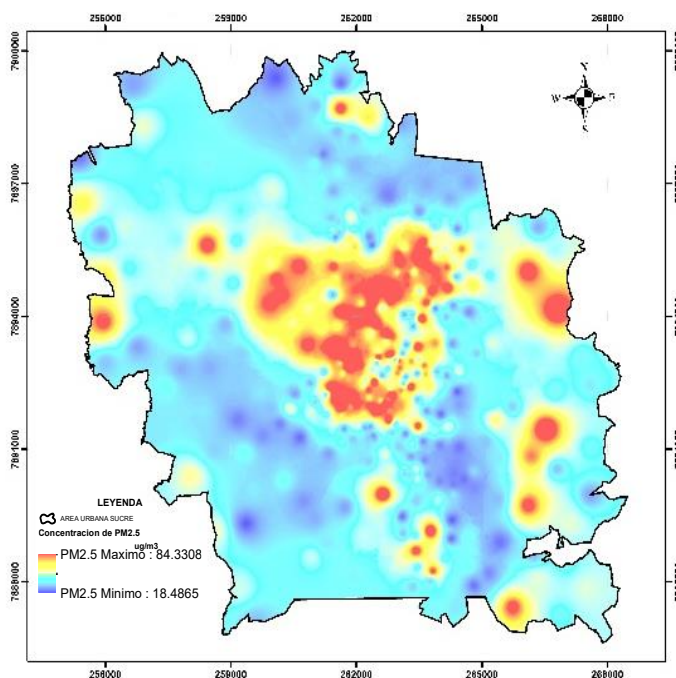
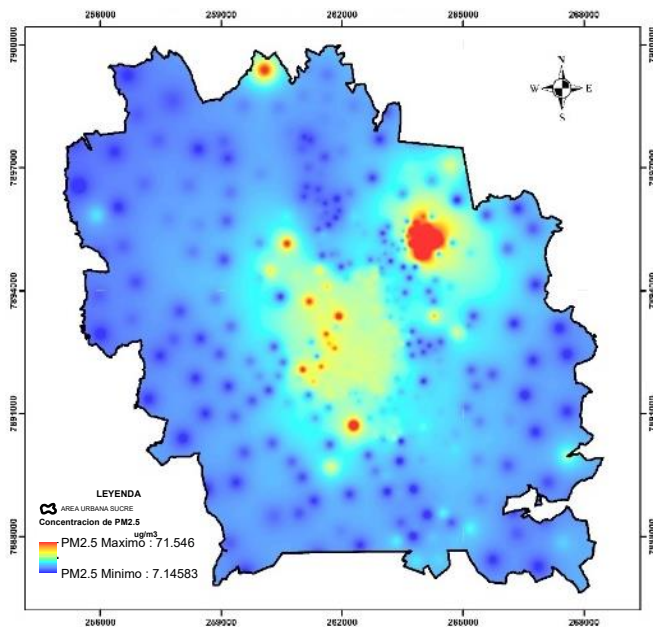


Figura 4 Distribución espacial de los niveles de PM2.5 enero 2024



Discusión

En este estudio, se analizó la distribución espacial de las concentraciones de material particulado (PM2.5) en el área urbana del municipio de Sucre entre 2023 y 2024 a partir de la integración de imágenes satelitales Sentinel-2A y datos de monitorización in situ. Este enfoque permitió evaluar la capacidad de los modelos de regresión lineal múltiple para representar la variabilidad espacial del PM2.5 en un contexto urbano con una cobertura limitada de estaciones de monitoreo.

Una de las principales contribuciones del estudio es la comparación entre los valores estimados por el modelo y las concentraciones registradas por la red MoniCA. El modelo seleccionado presentó un alto coeficiente de determinación ($R^2 = 0,92$) y un bajo error de estimación, lo que evidencia una buena correspondencia entre los datos modelados y las mediciones reales. Estos resultados son coherentes con investigaciones previas que destacan la utilidad de la teledetección como herramienta complementaria para la monitorización de contaminantes atmosféricos, especialmente en ciudades intermedias.

La distribución espacial del PM2.5 mostró concentraciones más elevadas en sectores caracterizados por una alta intensidad de tráfico y actividad urbana, especialmente en zonas cercanas a la terminal de autobuses y a las principales avenidas. Este patrón espacial concuerda con estudios similares realizados en otras ciudades de la región, en los que el parque automotor constituye una de las principales fuentes de emisión de material particulado fino, especialmente en periodos secos.

El valor promedio estimado de PM2.5 para agosto de 2023 ($23,51 \mu\text{g}/\text{m}^3$) supera los valores guía recomendados por la Organización Mundial de la Salud, por lo que existe un riesgo potencial para la salud de la población expuesta. Esta situación subraya la necesidad de reforzar las estrategias de gestión ambiental y de control de emisiones en las zonas más afectadas de la ciudad.

Aunque los resultados obtenidos son satisfactorios, se identifican algunas limitaciones relacionadas con la disponibilidad temporal de los datos de monitoreo, la diferencia horaria entre la adquisición de las imágenes por satélite y los registros in situ, y el hecho de que no se hayan incluido explícitamente variables meteorológicas en el modelo. Estas condiciones pueden influir en las diferencias observadas entre los valores estimados y medidos, pero no invalidan la aplicabilidad del enfoque propuesto.

En conjunto, los resultados obtenidos confirman que la combinación de datos satelitales y técnicas de regresión es una alternativa eficaz para estimar y analizar espacialmente el PM2.5, y aporta información relevante para la gestión de la calidad del aire y la planificación urbana en el municipio de Sucre.

Conclusiones

Este estudio demuestra que la integración de imágenes satelitales Sentinel-2A con datos de monitoreo in situ permite estimar de manera fiable las concentraciones de PM2.5 en la zona urbana de

Sucre e identificar patrones espaciales asociados al tráfico rodado y a la actividad urbana.

El modelo de regresión lineal múltiple seleccionado presentó un alto grado de precisión ($R^2 = 0,92$), lo que evidencia que la teledetección de alta resolución es una herramienta eficaz para el monitoreo de la calidad del aire en ciudades intermedias y de esta manera orientar estrategias de gestión ambiental y protección de la salud pública.

Referencias

- Castro, P., Vera, J., Cifuentes, L., Wellenius, G., Verdejo, H., Sepúlveda, L., Vukasovic, J. L., & Llevaneras, S. (2010). Polución por material particulado fino (PM2.5) incrementa las hospitalizaciones por insuficiencia cardiaca. *Revista Chilena de Enfermedades Respiratorias*, 26(3), 163–170. https://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-85602010000300004
- Gomez, L. (2024). Determinación de PM10 en Sucre con imágenes satelitales Landsat 8 y datos de monitoreo in situ. *Revista Ingeniería Sostenible Ambiental*, 1(1), 33-40. <https://doi.org/10.56469/risa.v1i1.1970>
- Guo, C., Zhang, Z., Lau, A., Tam, T., Chan, T.-C., Lao, X., & Chang, L. (2018). Satellite-Based Estimates of Long-Term Exposure to PM2.5 and its Association with Chronic Obstruct Pulmonary Disease in Taiwan Adults. En *ISEE Conference Abstracts* (Vol. 2017). <https://doi.org/10.1289/isee.2017.2017-284>
- Guo, Y., Feng, N., Christopher, S. A., Kang, P., Zhan, F. B., & Hong, S. (2014). Satellite remote sensing of fine particulate matter (PM2.5) air quality over Beijing using MODIS. *International Journal of Remote Sensing*, 35(17), 6522-6544. <https://doi.org/10.1080/01431161.2014.958245>
- Mozafari, S. M., Hasanlou, M., & Arefi, H. (2019). *Archivos ISPRS* - Estimación de la contaminación atmosférica mediante el espesor óptico de aerosoles con imágenes OLI en Teherán. *ISPRS Archives*, XLII-4/W18, 779–784. <https://isprs-archives.copernicus.org/articles/XLII-4-W18/779/2019/isprs-archives-XLII-4-W18-779-2019>
- High-resolution aerosol retrieval over urban areas using Sentinel-2 data. (2023). *ResearchGate*. https://www.researchgate.net/publication/354155901_High-resolution_aerosol_retrieval_over_urban_areas_using_sentinel-2_data
- Drusch, M., Del Bello, U., Carlier, S., Colin, O., Fernandez, V., Gascon, F., ... & Bargellini, P. (2012). Sentinel-2: ESA's optical high-resolution mission for GMES operational services. *Remote Sensing of Environment*, 120, 25–36. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.11.026> (doi.org in Bing)
- SSPH+. (2019). WHO air quality guidelines 2021 – Aiming for healthier air for all: A joint statement by medical, public health, scientific societies and patient representative organisations. *International Journal of Public Health*, 66, 1604465. <https://www.ssph-journal.org/journals/international-journal-of-public-health/articles/10.3389/ijph.2021.1604465/full>
- Oliveira, M., Slezakova, K., Delerue-Matos, C., Pereira, M. C., & Morais, S. (2019). Children environmental exposure to particulate matter and polycyclic aromatic hydrocarbons and biomonitoring in school environments: A review on indoor and outdoor exposure levels, major sources and health impacts. *Environment International*, 124, 180-204. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2018.12.052>

- Querol, X., Tobías, A., Pérez, N., Karanasiou, A., Amato, F., Stafoggia, M., Pérez García-Pando, C., Ginoux, P., Forastiere, F., Gumy, S., Mudu, P., & Alastuey, A. (2019). Monitoring the impact of desert dust outbreaks for air quality for health studies. *Environment International*, 130, 104867. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.05.061>
- Tello-Cifuentes, L., & Díaz-Paz, J. P. (2021). Análisis de la contaminación ambiental usando técnicas de teledetección y análisis de componentes principales. *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*, 100(1), 22–34. http://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=S0123-77992021000100022&script=sci_arttext
- Van Donkelaar, A., Martin, R. V., Brauer, M., Kahn, R., Levy, R., Verduzco, C., & Villeneuve, P. J. (2010). Global Estimates of Ambient Fine Particulate Matter Concentrations from Satellite-Based Aerosol Optical Depth: Development and Application. *Environmental Health Perspectives*, 118(6), 847-855. <https://doi.org/10.1289/ehp.0901623>
- Venegas, L. E., & Mazzeo, N. A. (2010). An ambient air quality monitoring network for Buenos Aires city. *International Journal of Environment and Pollution*, 40(1-3), 184-194. <https://doi.org/10.1504/IJEP.2010.030921>
- WHO global air quality guidelines: Particulate matter (PM2.5 and PM10), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide. (2023.), de https://www.who.int/publications/i/item/9789240034228?utm_source=chatgpt.com

Evaluación de impacto ambiental de actividades mineras en la microcuenca de la comunidad de Siporo

Environmental impact assessment of mining activities in the micro-basin of the Siporo community

LOPEZ – Vladimir^{1*}

¹ *Universidad Mayor Real y Pontificia de San Francisco Xavier de Chuquisaca, Carrera de Ingeniería Ambiental*

Recibido septiembre,05, 2025; Aceptado octubre, 30, 2025

Resumen

Este trabajo evaluó el impacto ambiental generado por las actividades mineras desarrolladas por cooperativas que operan en la microcuenca de la comunidad de Siporo, ubicada en el municipio de Betanzos, departamento de Potosí, Bolivia. La investigación se enfocó en la etapa de funcionamiento de la actividad minera, considerando los componentes ambientales agua, ecológico y socioeconómico. Para la evaluación se aplicó el método de Battelle–Columbus Modificado, adaptado a la normativa ambiental boliviana vigente. Se elaboró una línea base ambiental mediante trabajo de campo, análisis de laboratorio de muestras de agua, encuestas a la población y revisión documental. Los resultados evidenciaron alteraciones significativas en la calidad del agua, presencia de descargas líquidas con parámetros fuera de los límites permisibles, afectaciones ecológicas relacionadas con pérdida de cobertura vegetal y procesos erosivos, así como impactos socioeconómicos vinculados a salud y dinámica productiva. Finalmente, se cuantificó el impacto ambiental neto y se propusieron medidas de mitigación orientadas a reducir los efectos negativos más críticos, promoviendo una gestión ambiental más sostenible en la microcuenca.

Palabras Clave

Battelle-Columbus, minería, contaminación hídrica, Siporo.

Abstract

This study assessed the environmental impact of mining activities carried out by cooperatives operating in the micro-watershed of the community of Siporo, located in the municipality of Betanzos, department of Potosí, Bolivia. The research focused on the operational phase of mining activities, considering the environmental components of water, ecology, and socioeconomic factors. The Modified Battelle–Columbus method, adapted to current Bolivian environmental regulations, was applied for the assessment. An environmental baseline was established through fieldwork, laboratory analysis of water samples, surveys of the population, and a literature review. The results revealed significant alterations in water quality, the presence of liquid discharges with parameters exceeding permissible limits, ecological impacts related to loss of vegetation cover and erosion processes, as well as socioeconomic impacts linked to health and productive dynamics. Finally, the net environmental impact was quantified, and mitigation measures were proposed to reduce the most critical negative effects, promoting more sustainable environmental management in the micro-watershed.

Keywords

Battelle-Columbus, mining, water pollution, Siporo.

Citación: Lopez V.(2025). Evaluación de impacto ambiental de actividades mineras en la microcuenca de la comunidad de Siporo *Revista Ingeniería Sostenible Ambiental*, 2(5), 157-164

Introducción

La minería, siendo una actividad económica fundamental en Bolivia, conlleva impactos ambientales significativos que afectan la calidad del agua y los ecosistemas circundantes. En la microcuenca de la Comunidad de Siporo, las actividades mineras han generado preocupaciones sobre la contaminación del agua y la salud ambiental, especialmente debido a la descarga de residuos y efluentes. (Mudd M, 2010)

En la microcuenca de la comunidad de Siporo, ubicada en el municipio de Betanzos del departamento de Potosí, operan cooperativas mineras que desarrollan actividades extractivas en etapa de funcionamiento. Estas actividades incluyen la extracción de minerales y la descarga de efluentes hacia cuerpos de agua cercanos. La proximidad de estas operaciones al cauce del río Siporo ha generado preocupación en la población local respecto a la posible contaminación hídrica y la degradación del entorno natural

Este estudio aborda la problemática mediante la evaluación de impactos ambientales aplicando el método de Battelle-Columbus Modificado. Este método permite utilizar indicadores de impacto ambiental para determinar los porcentajes de afectación sobre el medio ambiente y expresar el valor del impacto ambiental neto. La investigación se justifica en la necesidad urgente de cuantificar los daños en una zona estratégica para el abastecimiento de agua y la agricultura, donde la falta de regulaciones estrictas pone en riesgo la salud de las comunidades locales. (Gerard , 2007)

La microcuenca constituye un sistema ambiental complejo donde interactúan componentes físicos, biológicos y socioeconómicos. El agua del río es utilizada por la comunidad para actividades domésticas, agrícolas y pecuarias, lo que incrementa la vulnerabilidad ante cualquier alteración en su calidad.

Asimismo, la cobertura vegetal y la estabilidad del suelo cumplen un rol fundamental en la regulación hídrica y la prevención de procesos erosivos.

El estudio se fundamenta en la legislación ambiental boliviana, incluyendo la Ley del Medio Ambiente N° 1333 y el Reglamento en Materia de Contaminación Hídrica. El objetivo principal es evaluar el impacto ambiental en la etapa de funcionamiento de las mineras para formular medidas de mitigación y control efectivas.

Materiales y métodos

Área de estudio.

El estudio se realizó en la microcuenca de la comunidad de Siporo, situada en el municipio de Betanzos, Departamento de Potosí, a una altitud media de 3.200 m.s.n.m. El área de influencia directa se determinó en base a la extensión de los impactos sobre la calidad del agua del río Siporo y las zonas de operación de las cooperativas mineras. Se delimitó el área de influencia directa e indirecta de las actividades mineras considerando la ubicación de las descargas líquidas, el recorrido del cauce y la proximidad a zonas habitadas.

Población y muestra

La población de interés estuvo conformada por los habitantes de la comunidad de Siporo, quienes dependen de los recursos naturales de la microcuenca. Se seleccionó una muestra representativa mediante un muestreo aleatorio simple, con el fin de recopilar información sobre la percepción de la contaminación minera y sus efectos en la salud y actividades económicas.

Metodología

La investigación combinó métodos teóricos y empíricos:

Métodos Teóricos.

- Análisis documental de normativa ambiental vigente, literatura científica y estudios previos relacionados con minería y calidad del agua.
- Método deductivo, partiendo de principios generales sobre contaminación minera para analizar la situación específica de la microcuenca.
- Método inductivo, basado en observaciones y datos de campo para establecer conclusiones generales. (Sánchez Flores, 2018)

Métodos Empíricos

- Observación directa en campo para identificar fuentes de impacto.
- Toma de muestras de agua en puntos estratégicos aguas arriba y aguas abajo de las descargas.
- Análisis de laboratorio para determinar parámetros físico-químicos como pH, aceites y grasas, y otros indicadores relevantes.
- Aplicación de encuestas a la población local.
- Georreferenciación de puntos de muestreo mediante GPS. (Rodrigo Herrera, Pacheco Mollinedo, Orihuela, Piñeiros, & Cobo, 2018)

Método de Evaluación

Se utilizó el método de Battelle-Columbus Modificado, seleccionando 3 categorías (Agua, Ecología y Socioeconómico), 11 componentes y 29 parámetros ambientales. Para la valoración de la importancia del impacto, se utilizó la caracterización según la Norma Española y la siguiente ecuación: (Gerard, 2007)

$$IM = \pm (3I + 2EX + \sum_{i=4}^{11} Ci)$$

$$IM = \pm (3 * I + 2 * EX + MO + PE + RV + MC + EF + SI + AG + PR)$$

En donde IM es la Importancia del Impacto, I es la intensidad, EX la extensión, y los demás términos corresponden a momento, persistencia, reversibilidad, recuperabilidad, efecto, sinergia, acumulación y periodicidad. (Coneza Fdez, 2011)

Para el cálculo del Impacto Neto y el porcentaje de afectación según el método Battelle, se emplearon las Unidades de Impacto Ambiental (UIA) y el Índice Ponderal (IP), utilizando la siguiente relación:

$$\% \text{ del Impacto Neto} = \left(1 - \frac{UIA_{total}}{IP_{total}}\right) * 100$$

Línea Base Ambiental

La línea base ambiental se estructuró en tres componentes:

Medio físico (calidad del agua): Evaluación de calidad del agua del río Siporo mediante análisis de laboratorio y comparación con los límites máximos permisibles establecidos en el Reglamento en Materia de Contaminación Hídrica.

Medio ecológico (cobertura vegetal y alteración del entorno): Identificación de cobertura vegetal, presencia de procesos erosivos y alteraciones en el paisaje.

Medio socioeconómico (percepción de la población): Caracterización de la población, actividades productivas y percepción sobre los impactos mineros.

Se realizaron visitas de campo para identificar puntos de descarga, áreas de influencia directa e indirecta y condiciones generales del entorno. (Bolivia Ministerio de Medio Ambiente y Agua, 2018)

Recolección de datos

Se establecieron dos puntos de muestreo de agua: uno aguas arriba y otras aguas abajo de las operaciones mineras. Los análisis físico-químicos se contrastaron con los Límites Máximos Permisibles (LMP) del Reglamento en Materia de Contaminación Hídrica (Bolivia, 1995). Además, se aplicaron encuestas a la población para evaluar la percepción socioeconómica y de salud.

Aplicación del Metodo Battelle – Columbus Modificado.

El método Battelle–Columbus consiste en la evaluación de un conjunto de parámetros ambientales agrupados en categorías, a los cuales se les asigna un peso relativo y un valor de calidad ambiental. En esta investigación, el método fue adaptado considerando tres componentes principales: agua, ecológico y socioeconómico.

Se establecieron matrices de identificación de impactos, donde se relacionaron actividades mineras con factores ambientales afectados. Posteriormente, se realizó la caracterización de los impactos según criterios como intensidad, extensión, duración, reversibilidad e importancia. El Índice de Calidad Ambiental (ICA) fue calculado para cada componente, permitiendo cuantificar el impacto ambiental neto. Finalmente, se determinó el porcentaje de afectación y se jerarquizaron los impactos en función de su significancia.

El método se adaptó considerando:

- Identificación de impactos
- Caracterización según la Norma Española (magnitud, extensión, duración, reversibilidad, etc.)
- Asignación de importancia del impacto (IM)
- Conversión de valores a unidades conmensurables (Índice de Calidad Ambiental – ICA)

La evaluación permitió determinar el impacto ambiental neto y clasificar los impactos como irrelevantes, moderados, severos o críticos. (Gerard , 2007)

Resultados

Análisis de calidad del agua: El monitoreo realizado en época húmeda mostró que, aunque hubo dilución por lluvias, ciertos parámetros excedieron la norma.

Tabla 1. Resultados de Laboratorio seleccionados comparados con LMP.

Parámetros	Unidades	Límite Máximo Permisible (RMCH)	Punto 1 (Aguas Arriba)	Punto 2 (Aguas Abajo)	Estado
pH	Esc. pH	6.9 - 9.0	8.196	7.746	Alcalino
Aceites y Grasas	mg/l	0.3	0.3	0.4	Fuera de norma
Cadmio	mg/l	0.15	0.055	0.055	Dentro de norma
Plomo	mg/l	0.05	<0.01	<0.01	Dentro de norma

Se observa que el pH es alcalino en ambos puntos y la presencia de aceites y grasas supera el límite específico de 0.3 mg/l en el punto aguas abajo, confirmando descargas de efluentes.

Estos resultados confirman la existencia de descargas líquidas provenientes de las actividades mineras hacia el cauce del río Siporo. La alteración del pH puede afectar la biota acuática, alterar procesos biogeoquímicos y limitar el uso del agua para consumo humano y riego. La presencia de aceites y grasas genera una película superficial que reduce el intercambio de oxígeno, afectando organismos acuáticos.

La comparación de parámetros con los límites permisibles permitió identificar impactos negativos significativos en el componente agua.

Evaluación Battelle-Columbus: La aplicación del método permitió cuantificar la afectación por categorías.

Tabla 2. Resumen de la Evaluación de Impacto Ambiental.

Categoría Ambiental	Índice Ponderal (IP)	UIA Calculada (Con Proyecto)	% Afectación
Ecología	195	97.5	50.00%
Contaminación (Agua)	340	157.5	53.67%
Socioeconómico	465	164.25	64.68%
TOTAL / IMPACTO NETO	1000	419.25	58.08%

El componente socioeconómico resultó ser el más afectado con un 64.68%, seguido por la contaminación del agua y la ecología.

Las encuestas aplicadas a la población revelaron percepciones mixtas respecto a la actividad minera. Por un lado, se reconoce el aporte económico y la generación de empleo. Por otro, se reportaron molestias relacionadas con polvo, ruido, tránsito de maquinaria pesada y posibles afectaciones a la salud.

El componente socioeconómico mostró impactos tanto negativos como positivos. El método permitió ponderar ambos aspectos, determinando que, aunque existen beneficios económicos, los impactos negativos en salud y calidad de vida requieren atención.

Percepción Social: Las encuestas revelaron que 17 personas notan el agua más turbia, 16 perciben olores químicos y 18 reportan caminos muy dañados por el tránsito de maquinaria. Además, 11 personas reportaron un aumento en problemas de salud dérmicos y digestivos.

Tabla 3. Resultados de la Percepción Social.

Indicador Evaluado	Problema Identificado por la Comunidad	Cantidad de Personas (Encuestadas)	Interpretación del Impacto
Calidad del Agua	El agua está más turbia y sucia	17	Impacto Severo (Recurso Hídrico)
Calidad del Aire	Olor fuerte a químicos y polvo	16	Impacto Severo (Calidad de Aire)
Infraestructura	Caminos muy dañados por maquinaria	18	Impacto Severo (Infraestructura Vial)
Economía Local	Aumento de precios y alquileres	19	Alteración Económica (Inflación local)
Salud Pública	Problemas dérmicos y digestivos	11	Riesgo Sanitario Directo

Medidas de mitigación y control.

Con base en los resultados obtenidos, se propusieron las siguientes medidas:

Tratamiento de efluentes mineros: Implementación de sistemas de sedimentación y tratamiento previo a la descarga.

Control de aceites y grasas: Instalación de trampas de grasas y mantenimiento periódico de maquinaria.

Reforestación y restauración ecológica: Recuperación de áreas degradadas mediante especies nativas.

Control de polvo: Humectación de vías y uso de barreras naturales.

Monitoreo ambiental continuo: Programas periódicos de monitoreo de calidad de agua y seguimiento de indicadores ambientales.

Capacitación y educación ambiental: Sensibilización de trabajadores y comunidad sobre buenas prácticas ambientales.

Estas medidas buscan reducir el impacto ambiental neto y promover una gestión más responsable de la actividad minera en la microcuenca.

Discusión

El análisis realizado evidenció que el impacto neto del proyecto minero sobre la microcuenca alcanzó un 58,08 %, lo que refleja una afectación ambiental de magnitud considerable. Aunque la temporada de lluvias favoreció la dilución de metales pesados, evitando que en este muestreo específico se superaran los límites normativos, la persistencia de aceites, grasas y un pH alcalino pone de manifiesto deficiencias en la gestión de los efluentes.

En el ámbito socioeconómico se registró el mayor grado de afectación, atribuible a la relación directa entre la actividad minera y el deterioro de la calidad de vida. Este deterioro se manifestó en el incremento de precios locales, el daño severo a la infraestructura vial y los riesgos a la salud pública derivados de la exposición a polvo y agua contaminada.

Se identificaron impactos críticos que requieren medidas de mitigación inmediata, entre ellos la operación de maquinaria pesada responsable de emisiones de polvo y ruido, así como la descarga directa de efluentes sin tratamiento. Las acciones propuestas como la instalación de trampas de grasa, la neutralización del pH y el riego de vías se consideran técnica y económicamente viables para reducir dichos impactos.

La aplicación del método Battelle–Columbus Modificado permitió calcular el Índice de Calidad Ambiental para cada componente. El recurso hídrico presentó la mayor disminución en su índice, seguido del componente ecológico. El componente socioeconómico mostró un impacto neto moderado, resultado de la coexistencia de efectos positivos y negativos. En conjunto, el impacto ambiental neto global confirma una afectación significativa, lo que justifica la implementación prioritaria de medidas de mitigación, especialmente en el manejo de efluentes y el control de sedimentos, con el fin de preservar la integridad ecológica y social de la microcuenca.

Conclusiones

El estudio de línea base, complementado con la aplicación del método Battelle–Columbus Modificado, permitió determinar que las actividades mineras en Siporo generan un impacto ambiental neto del 58,08 %, lo que evidencia una afectación significativa. Los componentes más comprometidos fueron el socioeconómico y el recurso hídrico. Se constató que las operaciones de las cooperativas mineras constituyen la principal fuente de contaminación, afectando la calidad del agua mediante valores de pH y concentraciones de grasas fuera de norma, además de incrementar la turbidez por procesos de sedimentación. En el ámbito social, la comunidad enfrenta problemas de salud, inflación local y deterioro de la infraestructura vial, mientras que el componente ecológico reflejó pérdida de cobertura vegetal. La metodología empleada permitió cuantificar y jerarquizar los impactos según su relevancia, facilitando la identificación de medidas de mitigación orientadas a los efectos más críticos. Entre las acciones prioritarias destacan la construcción de áreas de mantenimiento impermeables con trampas de grasa, la implementación de sistemas de neutralización de efluentes y el establecimiento de un programa riguroso de control de polvo y mantenimiento vial. La adopción de estas medidas resulta esencial para garantizar la sostenibilidad ambiental de la comunidad de Siporo, contribuyendo a la reducción de los impactos negativos y al fortalecimiento de la resiliencia socioecológica de la microcuenca.

Referencias

- Albornoz Zamora, E. J., Guzmán, M., Sidel Almache, K. G., Chuga Guamán, J. G., & González Villanueva, J. L. (2023). *Metodología de la investigación aplicada a las ciencias de la salud y educación*. Mawil Publicaciones de Ecuador. doi:<https://doi.org/10.26820/978-9942-622-59-4>
- Aliaga Churrurrin, D. G. (vol.25 no.25 La Paz mar. 2023 de Marzo de 2023). La reutilización del agua en la minería con enfoque en economía circular. *Difusión cultural y científica de la Universidad La Salle en Bolivia*, 25 (25). Obtenido de http://www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2071-081X2023000100010
- Berna, K. (2017). La minería y los Objetivos de Desarrollo Sostenible: Una revisión sistemática de la literatura. En *Desarrollo sostenible en la industria minera* (p. 4). PiriPiri: Agiuotantis.
- Conesa Fernández-Vitoria, V. (2010) *Guía metodológica para la evaluación del impacto ambiental*. Madrid: Mundi-prensa. Obtenido de <https://books.google.com.co/books?id=wa4SAQAAQBAJ&printsec=frontcover&hl=es#v=onepage&q&f=false>
- Gerard , K. (Diciembre de 2007). *Valoración de Impactos Ambientales en Ingeniería Ambiental - 48148*. INERCO, Sevilla . Obtenido de Studocu: <https://www.studocu.com/bo/document/uni-versidad-mayor-real-y-pontificia-san-francisco-xavier-de-chuquisaca/manejo-de-residuos-solidos/componente-48148-libro-ingenieria-ambiental/51936672>

- INERCO. (Diciembre de 2007). Valoración de impactos ambientales. *Studocu*. Obtenido de <https://www.studocu.com/bo/document/universidad-mayor-real-y-pontificia-san-francisco-xavier-de-chuquisaca/manejo-de-residuos-solidos/componente-48148-libro-ingenieria-ambiental/51936672>
- Luyo Carrasco, A. F. (2019). *Aplicación del modelo cuantitativo Battelle Columbus para la caracterización ambiental del entorno de un proyecto minero*. Lima: Facultad de Ingeniería Geográfica, Ambiental y Ecoturismo.
- Martínez Salgado, C. (Marzo de 2012). El muestreo en investigación cualitativa: principios básicos y algunas controversias. *Ciência & Saúde Coletiva*, 17(3). doi:10.1590/S1413-81232012000300006
- Morales Anaya, J. A., & Evia V, J. L. (Agosto de 1995). Minería y medio ambiente en Bolivia. (U. C. Instituto de Investigaciones Socio-Económicas (IISEC), Ed.) *ECONSTOR*(04/95). Obtenido de https://iisec.ucb.edu.bo/assets_iisec/publicacion/Mineria_y_medio_ambiente_en_Bolivia.pdf
- Moyya Colque, J. (2020). *Impacto economico y ambiental de la extraccion de minera en las comunidades y las subcuencas Poopo-Antequera-Pazña*. La Paz: Universidad San Andres.
- Mudd M, G. (2010). Megatendencias clave y limitaciones inminentes. En *La sostenibilidad ambiental de la minería en Australia*: (págs. 98-115). Elsevier.
- Reglamento de Ley No 1333 del Medio Ambiente. (1992, 15 de junio). *Reglamento General de Gestión Ambiental; Reglamento en Materia de Contaminación Hídrica; Reglamento para Actividades con Sustancias Peligrosas; Reglamento de Prevención y Control Ambiental*. República de Bolivia. Obtenido de https://www.oas.org/dsd/fida/laws/legislation/bolivia/bolivia_1333.pdf
- Sánchez Flores, F. A. (15 de Junio de 2018). Fundamentos Epistémicos de la Investigación Cualitativa y Cuantitativa: Consensos y Disensos. *Revista digital de investigación en docencia universitaria ISSN 2223-2516*. Obtenido de <https://orcid.org/0000-0002-0144-9892>
- SEET . (2018). Nación del agua derivada de la actividad minera: Una visión general. En *Actas de Conferencia Anual* (p. 703). Akure: SEET'18.
- Strosnider W. H. J., Llanos, F. S., Marcillo, C. E., Callapa, R. R., & Nairn, R. (2014, julio-septiembre). Impacto en afluentes del río Pilcomayo por contaminantes adicionales de drenaje ácido de minas desde Cerro Rico, Potosí-Bolivia. *Avances en Ciencias e Ingeniería*, 5(3). <https://www.redalyc.org/pdf/3236/323632128001.pdf>
- Tripathi, S. (2020). Evaluación del impacto ambiental y de los medios de vida de las inundaciones utilizando un sistema de evaluación utilizando un sistema de evaluación. En *Teledetección y GISciencia* (págs. 11-34).

Vilela Pincay , W. (2020). La contaminación ambiental ocasionada por la minería en la provincia de El Oro. *revista internacional de administración No. 8, 3*.

Weston Solution . (12 de August de 2015). *Superfund Technical Assessment and Response Team (START)*. Obtenido de Draft Technical : https://19january2021snapshot.epa.gov/sites/static/files/2015-08/documents/draft_technical_memo_august_12_2015_08-1574032.pdf

Tratamiento pasivo de drenaje neutro contaminado mediante biorreactor sulfato-reductor en minería no metálica

Passive treatment of contaminated neutral drainage using sulfate-reducing bioreactor in non-metallic mining

DIAZ – Areli¹ *

¹Universidad Mayor Real y Pontificia de San Francisco Xavier de Chuquisaca, Carrera de Ingeniería Ambiental.

Recibido octubre, 03, 2025; Aceptado noviembre, 21, 2025

Resumen

La minería de yeso genera pasivos ambientales que emiten Drenaje Neutro Contaminado (DNC), un efluente rico en sulfatos y de difícil tratamiento convencional. Este estudio diseña un sistema de tratamiento pasivo para la Cantera Milluni (Bolivia), cuyo efluente presenta concentraciones de sulfatos (700 mg/L) y hierro (2,80 mg/L) que superan la normativa. Se aplicó ingeniería de detalle para dimensionar un Biorreactor Sulfato-Reductor adaptado a condiciones semiáridas y variaciones extremas de caudal (de 0 a 2 m³/h). La metodología abarcó la caracterización hidroquímica y el modelado hidráulico mediante la Ley de Darcy. Los resultados establecen el uso de un sustrato orgánico local y proyectan un Tiempo de Retención Hidráulica de 22 días para compensar la baja cinética bacteriana en climas fríos, garantizando la saturación anóxica permanente mediante dispositivos de control de nivel. Se concluye que la implementación del biorreactor es una estrategia viable para reducir los sulfatos a <300 mg/L, proponiendo un modelo técnico sostenible para la remediación de pasivos hídricos en la minería no metálica boliviana.

Palabras Clave

Drenaje neutro contaminado, minería de yeso, tratamiento pasivo, pasivos ambientales.

Abstract

Gypsum mining generates environmental liabilities that produce Contaminated Neutral Drainage (CND), an effluent rich in sulfates that is difficult to treat using conventional methods. This study designs a passive treatment system for the Milluni Quarry (Bolivia), whose effluent contains concentrations of sulfates (700 mg/L) and iron (2.80 mg/L) that exceed regulatory limits. Detailed engineering was applied to design a sulfate-reducing bioreactor adapted to semi-arid conditions and extreme flow variations (from 0 to 2 m³/h). The methodology included hydrochemical characterization and hydraulic modeling using Darcy's Law. The results establish the use of a local organic substrate and project a hydraulic retention time of 22 days to compensate for low bacterial kinetics in cold climates, ensuring permanent anoxic saturation through level control devices. It is concluded that the implementation of the bioreactor is a viable strategy for reducing sulfates to <300 mg/L, proposing a sustainable technical model for the remediation of water-related liabilities in Bolivian non-metallic mining.

Keywords Contaminated neutral drainage, gypsum mining, passive treatment, environmental liabilities.

Citación: Diaz A. (2025). Tratamiento pasivo de drenaje neutro contaminado mediante biorreactor sulfato-reductor en minería no metálica, *Revista Ingeniería Sostenible Ambiental*, 2(5), 165-170

Introducción

La industria extractiva global enfrenta el desafío perpetuo de gestionar los efluentes líquidos generados por la exposición de minerales a la intemperie. Mientras que el Drenaje Ácido de Roca (DAR), originado por la oxidación de sulfuros metálicos, cuenta con décadas de investigación y protocolos estandarizados de mitigación (Neculita et al., 2007), la minería no metálica y de minerales industriales ha operado en un relativo vacío técnico y regulatorio. La extracción de rocas evaporíticas, como el yeso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) y la anhidrita, da lugar a un fenómeno hidroquímico distinto conocido como Drenaje Neutro Contaminado (DNC) (Zeballos et al., 2017).

El DNC se caracteriza por presentar un pH en el rango de 6.5 a 8.5, pero con concentraciones ambientalmente tóxicas de sulfatos (SO_4^{2-}), dureza cálcica y, ocasionalmente, metales pesados o metaloides en solución que no precipitan a pH neutro (Gusek, 2002). En ecosistemas acuáticos, la hipersalinización por sulfatos altera la presión osmótica, afectando letalmente a las comunidades bentónicas y limitando severamente el uso del recurso hídrico para riego agrícola o consumo animal. En Bolivia, la carencia de instrumentos de gestión ambiental específicos para el cierre de canteras no metálicas ha derivado en la proliferación de pasivos mineros abandonados que lixivian continuamente sales hacia las cuencas hidrográficas (Cardenas Revilla, 2016).

La Cantera Milluni, en el municipio de Poroma, representa un caso de estudio representativo. Las operaciones extractivas a cielo abierto fragmentaron significativamente el macizo rocoso, incrementando exponencialmente el área superficial de contacto del yeso y las lutitas intercaladas con la escorrentía pluvial. Esto generó una degradación continua del Río Milluni, principal fuente de agua para las comunidades aledañas. Ante la inviabilidad económica de implementar y mantener sistemas de tratamiento activo (plantas de ósmosis inversa o precipitación química continua) en una cantera en fase de cierre, la ingeniería ambiental volcó su atención a las tecnologías de tratamiento pasivo.

Los Biorreactores Sulfato-Reductores se presentan como la alternativa más prometedora. Estos sistemas de base ecológica utilizan el metabolismo anaerobio de las bacterias sulfato-reductoras (BSR) para convertir el sulfato disuelto en sulfuro de hidrógeno (H_2S), el cual reacciona con los metales presentes para formar sulfuros metálicos insolubles (ej. FeS , ZnS) que quedan retenidos en el sustrato del reactor (Zagury et al., 2006). Sin embargo, el diseño de biorreactores en entornos andinos semiáridos enfrenta: temperaturas medias bajas que ralentizan la cinética enzimática bacteriana y regímenes de precipitación extremos que provocan fluctuaciones drásticas de caudal.

El presente artículo tiene como objetivo el diseño de ingeniería de un Biorreactor Sulfato-Reductor optimizado para el tratamiento del DNC en la Cantera Milluni. Se plantea la hipótesis de que mediante el ajuste matemático del Tiempo de Retención Hidráulica (TRH) y la formulación de una matriz orgánica local, es posible diseñar un sistema pasivo capaz de tolerar periodos prolongados de estiaje sin mortandad bacteriana, garantizando la reducción teórica de los sulfatos por debajo de los límites normativos exigidos para la rehabilitación sostenible del área.

Materiales y métodos

Área de estudio y contexto hidrológico

La investigación se enmarca en la Cantera Milluni (Coordenadas UTM 20K 248075 E, 7917036 N), situada a 2,400 m.s.n.m. en la provincia Oropeza, departamento de Chuquisaca. Geológicamente, el depósito consiste en estratos de yeso intercalados con limolitas y lutitas rojas de la formación Cretácica. El clima regional es subhúmedo seco. Los registros meteorológicos locales indican una precipitación media anual de 560.9 mm, con un patrón de distribución marcadamente estacional. Esta característica define un comportamiento hidrológico intermitente en los drenajes de la cantera, estableciendo los parámetros críticos de diseño: un caudal máximo de diseño (Q_{max}) de 2 m³/h durante los eventos de precipitación intensa

(diciembre a marzo) y un caudal mínimo (Q_{min}) de 0 m³/h durante la época seca (mayo a septiembre). La temperatura media anual es de 14.9°C, descendiendo significativamente durante los meses de invierno

Caracterización hidroquímica

Para determinar la carga contaminante y la influencia directa del pasivo minero, se estableció un diseño de muestreo en el cuerpo receptor principal (Río Milluni) durante el periodo de estiaje. Se definieron dos estaciones de monitoreo estratégico:

- **P-01 (Aguas Arriba):** Ubicado antes de la zona de influencia de la cantera, representando la línea base o fondo geoquímico natural del área gipsícola.
- **P-02 (Aguas Abajo):** Ubicado inmediatamente después de la confluencia de las escorrentías provenientes de los frentes de explotación y botaderos de desmonte.

La recolección, preservación y transporte de las muestras se realizó bajo los protocolos de la Norma Boliviana NB-512. Los análisis de laboratorio incluyeron la determinación de Sulfatos (método turbidimétrico), Hierro total (espectrofotometría), Turbidez (nefelometría), Dureza Total, pH y Sólidos Disueltos Totales (SDT).

Modelación y diseño del Biorreactor Sulfato-Reductor

El dimensionamiento del sistema de tratamiento pasivo se basó en los principios de flujo en medios porosos y la cinética de reducción biológica. El proceso de diseño se dividió en tres fases analíticas Formulación del Sustrato Reactivo:

Se diseñó una matriz porosa compleja orientada a proveer permeabilidad a largo plazo y una liberación sostenida de carbono orgánico disuelto (COD). La composición teórica incluye la fuente bacteriana (sedimentos de arroyo), neutralizador de pH (carbonato cálcico), fuente de nitrógeno (urea), medio poroso (arena tamizada entre 0,5 y 2 mm) y fuente de carbono (virutas de madera de arce, estiércol de aves de corral, compost de hojas, aserrín de abeto y etanol).

Se asumió una porosidad efectiva de diseño del 30% (0.30) para la mezcla

Cálculos de Dimensionamiento Hidráulico:

Se utilizó el caudal máximo de diseño ($Q_{max} = 2$ m³/h o 48 m³/día) para dimensionar el volumen de vacíos necesario. El Tiempo de Retención Hidráulica (TRH) se proyectó utilizando la ecuación volumétrica estándar:

$$TRH = \frac{V \times \eta}{Q}$$

Donde V es el volumen total de la capa de sustrato en m³, η es la porosidad y Q es el caudal volumétrico. Se aplicó la Ley de Darcy ($Q = K \cdot A \cdot i$) para verificar que la conductividad hidráulica (K) de la mezcla orgánica permite el flujo vertical descendente sin generar un nivel freático superficial que supere el bordo libre de las celdas.

Estrategia de resiliencia al estiaje:

Para abordar la condición crítica de $Q = 0$ m³/h en la época seca, el diseño incluyó una configuración de plomería con descarga de nivel controlado (dispositivo tipo codo invertido o *Agri-Drain*) en el colector efluente, garantizando que el medio reactivo permanezca hidrológicamente saturado independientemente de la falta de influyente.

Resultados

Alteración hidroquímica del cuerpo receptor

Los resultados analíticos de laboratorio demuestran cuantitativamente el impacto de la exposición del material minero sobre la química del agua. En la Tabla 1 se exponen los parámetros críticos evaluados y su evolución a través del tramo de la cantera.

Tabla 1. Dinámica de la calidad del agua en el área de influencia (Río Milluni)

Parámetro Físicoquímico	Unidad	Aguas Arriba (P-01)	Aguas Abajo (P-02)	Límite Permisible (RMCH)	Incremento %
Sulfatos	mg/L	117.0	700.0	400.0	+498%
Hierro Total	mg/L	0.05	2.80	1.0	+5,500%
Turbidez	NTU	1.45	64.1	N/A	+4,320%
Dureza Total	mg/L CaCO ₃	320.0	1,135.0	N/A	+254%
pH	Unidad	7.8	7.2	6.0 - 9.0	-7%
Sólidos Disueltos	mg/L	480.0	1,450.0	1,500.0	+202%

Los datos revelan que el cuerpo receptor ingresa a la concesión minera cumpliendo los estándares de calidad (P-01). Sin embargo, la lixiviación del pasivo genera un incremento masivo en la concentración de sulfatos (+498%), superando el límite permisible de 400 mg/L y confirmando la presencia de Drenaje Neutro Contaminado. Simultáneamente, el hierro experimenta un aumento anómalo (hasta 2.80 mg/L), sugiriendo la micro-oxidación de sulfuros presentes en la matriz de las lutitas. El incremento exponencial de la turbidez (de 1.45 a 64.1 NTU) refleja un intenso proceso de erosión y arrastre de finos desde los acopios de material de descarte no estabilizados

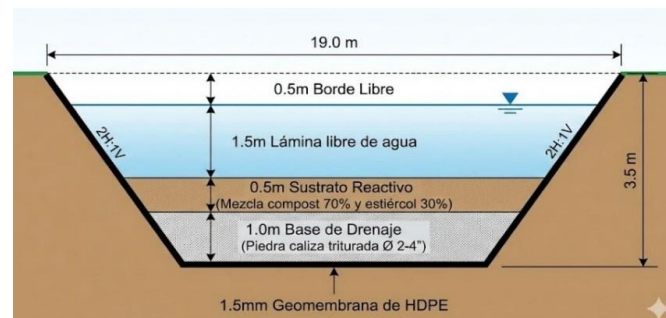
Parámetros de diseño del biorreactor

Para tratar la carga química observada en el punto P-02, el modelo de ingeniería proyectó la construcción de dos celdas de biorreacción operando en paralelo. Esta redundancia asegura la continuidad del tratamiento durante las operaciones de mantenimiento.

Los parámetros de diseño calculados arrojan las siguientes dimensiones métricas y volumétricas por celda:

- Área superficial activa: 263 m² por celda (526 m² totales).

- Perfil estratigráfico: Un espesor total útil de 1.5 metros, compuesto por una capa basal de drenaje de grava caliza de 1 m (para la recolección del efluente y soporte estructural) y una capa superior de sustrato reactivo orgánico de 0.5 m de espesor.
- Columna de agua superficial: Un tirante de agua permanente de 1.5 m sobre el sustrato para garantizar un sello hidráulico anaerobio e insolación térmica.
- Borde Libre (0.5 m): Como resguardo de seguridad para contención de eventos pluviométricos extremos.

Figura 1. Modelo conceptual de la celda de tratamiento pasivo – corte transversal

Bajo estas dimensiones y asumiendo la porosidad ($\eta = 0.30$), el volumen de vacíos efectivo disponible para el contacto agua-bacteria es capaz de asimilar el caudal máximo crítico de 2 m³/h (48 m³/día) manteniendo un tiempo de retención hidráulica teórico de 22 días. El diseño del sistema de descarga garantiza que durante los meses donde la precipitación es nula ($Q=0$), la columna de 1.5 m de sustrato y grava permanezca inundada a capacidad de campo, creando un ambiente biológicamente latente pero viable, gracias a la lámina de agua superficial (1.5 m) que absorbe la disminución por evaporación en los meses secos

Discusión

La estructuración del modelo de remediación hídrica para la Cantera Milluni requiere un análisis crítico de la viabilidad biotecnológica y sus implicaciones operativas.

Los resultados analíticos ratifican el diagnóstico primario: la Cantera Milluni no sufre de Drenaje Ácido, sino de un Drenaje Neutro Contaminado caracterizado por una hipersalinización de sulfatos (700 mg/L). La propuesta de diseño demuestra matemáticamente que la captura y derivación de estos caudales hacia un sistema de retención volumétrica de base orgánica (Biorreactor Sulfato-Reductor) posee la capacidad física para gestionar la totalidad de la carga efluente durante los picos máximos de precipitación, sentando las bases de una remediación pasiva sostenible.

El aspecto más distintivo del diseño radica en el cálculo del Tiempo de Retención Hidráulica (TRH). La literatura internacional convencional, como los estudios de Neculita et al. (2007) y Gusek (2002), sugiere TRH en el rango de 5 a 10 días para sistemas operando en climas templados o de laboratorio. Sin embargo, el dimensionamiento para Milluni exige un TRH de 22 días. Esta desviación intencional del estándar responde a la termodinámica del sitio. Con una temperatura media anual de 14.9°C y mínimas invernales más bajas, la tasa de reducción biológica del sulfato se deprime severamente. Un TRH de 22 días asegura el tiempo de contacto extendido necesario para que el consorcio bacteriano logre metabolizar el oxígeno disuelto remanente, reducir el SO₄²⁻ y precipitar el hierro (que ingresa a 2.80 mg/L) en forma de monosulfuro de hierro (FeS), garantizando el cumplimiento de la meta de abatimiento a <300 mg/L.

El mayor reto biotecnológico en la minería andina no es el tratamiento del agua, sino la supervivencia del sistema cuando no hay agua. La precipitación local de 560.9 mm impone un régimen donde el caudal cae a 0 m³/h durante al menos cuatro meses.

En biorreactores convencionales, la falta de influyente provoca el secado del sustrato, la invasión de oxígeno (aerobiosis) y la muerte masiva de las bacterias sulfato-reductoras, oxidando además los metales previamente retenidos. El diseño hidrodinámico propuesto soluciona este quiebre al incorporar un codo de retención (tipo Agri-Drain). Este aporte conceptual transforma al reactor de un sistema de flujo continuo a un sistema de discontinuidad controlada (batch en estiaje), manteniendo la anoxia y protegiendo el inóculo en estado de latencia hasta la reactivación por las primeras lluvias primaverales.

Desde la perspectiva de la gestión territorial, la estandarización de estos diseños representa un salto cualitativo para la minería de áridos y evaporitas en Bolivia. El Reglamento Ambiental para Actividades Mineras (RAAM) exige la mitigación de pasivos, pero sus guías técnicas están históricamente sesgadas hacia el tratamiento de la minería estannífera y argentífera. Demostrar la viabilidad del diseño de biorreactores con sustratos locales de bajo costo (estiércol, aserrín) provee a las autoridades (Ministerio de Minería y Metalurgia, Gobiernos Departamentales) de una herramienta técnica accesible para exigir cierres ambientales viables a cooperativas y pequeñas empresas no metálicas.

Es imperativo reconocer el carácter predictivo y proyectual de este trabajo. Los parámetros establecidos, incluyendo el TRH de 22 días y la eficiencia teórica de remoción, son estimaciones basadas en modelos cinéticos empíricos (Ley de Darcy y volumetría). La química real de las mezclas orgánicas complejas es altamente variable. Ciertas limitaciones operativas, como la potencial colmatación por la precipitación masiva de carbonatos (debido a la alta dureza de 1,135 mg/L), no pueden ser descartadas únicamente mediante modelación matemática y requieren validación empírica.

Para transitar del diseño conceptual a la construcción a escala real, la línea de investigación debe avanzar hacia la etapa de pilotaje.

Se recomienda la construcción inmediata de reactores de columna (escala bench) o mesocosmos in situ operando con el sustrato orgánico local formulado, sometidos a las fluctuaciones térmicas reales de Milluni. Asimismo, se requieren estudios de trazadores conservativos para determinar la hidrodinámica interna y descartar fenómenos de cortocircuito hidráulico dentro del sustrato. La gestión del Drenaje Neutro Contaminado en canteras de yeso ha sido históricamente subestimada, permitiendo la degradación silenciosa de las cuencas receptoras. El diseño del Biorreactor Sulfato-Reductor propuesto demuestra que, mediante la integración de la hidrología y la biotecnología pasiva, es posible diseñar infraestructuras ecológicas que neutralicen la contaminación química a largo plazo. Adaptar la ingeniería a las restricciones climáticas de la región andina es el paso fundamental para transformar los pasivos mineros irreversibles en sistemas controlados y ecológicamente seguros.

Conclusiones

La caracterización hidroquímica espacial de la Cantera Milluni confirma la existencia de un frente de contaminación activa, caracterizado como Drenaje Neutro Contaminado, con incrementos críticos de sulfatos (700 mg/L) y turbidez originados en las áreas de explotación expuestas. El diseño de ingeniería de detalle del Biorreactor Sulfato-Reductor establece que una configuración de flujo vertical descendente con 526 m² de área activa y 1.2 m de sustrato orgánico es capaz de gestionar el caudal crítico de 2 m³/h generado en los eventos máximos de precipitación local. La modelación matemática justificó la adopción de un tiempo de retención hidráulica extendido de 22 días como medida técnica compensatoria frente a las limitaciones de la cinética bacteriana en climas fríos (14.9°C), optimizando las condiciones para la reducción metabólica de los sulfatos. La integración de mecanismos de saturación forzada en el diseño asegura la resiliencia del consorcio microbiano anaerobio frente a la estacionalidad extrema de la zona, permitiendo la supervivencia del sistema durante los prolongados periodos de caudal nulo

Referencias

- Ayangbenro, A. S., & Babalola, O. O. (2017). A new strategy for heavy metal polluted environments: A review of microbial biosorbents. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 14(1), 94. <https://doi.org/10.3390/ijerph14010094>
- Cardenas Revilla, A. (2016). *Mine closure experiences—Bolivia, South America*. 707-714. https://doi.org/10.36487/ACG_rep/1608_52_Cardenas.
- Gusek, J. J. (2002). Sulfate-reducing bioreactor design and operating issues: Is this the passive treatment technology for you? *Mine Water and the Environment*, 21(2), 97-101.
- Hedin, R. S., Nairn, R. W., & Kleinmann, R. L. P. (1994). *Passive treatment of coal mine drainage* (Information Circular 9389). U.S. Department of the Interior, Bureau of Mines.
- Neculita, C. M., Zagury, G. J., & Bussièrè, B. (2007). Passive Treatment of Acid Mine Drainage in Bioreactors using Sulfate-Reducing Bacteria: Critical Review and Research Needs. *Journal of Environmental Quality*, 36(1), 1-16. <https://doi.org/10.2134/jeq2006.0066>
- Sekarjannah, F. A., Mansur, M., & Abidin, Z. (2021). Selection of organic materials potentially used to enhance bioremediation of acid mine drainage. *Journal of Degraded and Mining Lands Management*, 8(3), 2779-2789. <https://doi.org/10.15243/jdmlm.2021.083.2779>
- Zagury, G. J., Kulnieks, V. I., & Neculita, C. M. (2006). Characterization and reactivity assessment of organic substrates for sulphate-reducing bacteria in acid mine drainage treatment. *Chemosphere*, 64(6), 944-954
- Zeballos, A., Weihed, P., Blanco, M., & Machaca, V. (2017). Characterization of some nonmetallic resources in Bolivia: An overview of their potentiality and their application in specialized formulations. *Environmental Earth Sciences*, 76, 754. <https://doi.org/10.1007/s12665-017-7096-1>

Fabricación de ladrillos ecológicos con plásticos reciclables como alternativa sostenible en construcciones civiles**Manufacturing ecological bricks with recyclable plastics as a sustainable alternative in civil construction**VILACAGUA - Joaquín ¹¹*Universidad Mayor Real y Pontificia de San Francisco Xavier de Chuquisaca, Carrera de Ingeniería Ambiental.*

Recibido octubre,24, 2025 Aceptado noviembre,30,2025

Resumen

El presente estudio aborda la fabricación de ladrillos ecológicos a partir de plásticos reciclables recolectados en campañas con unidades educativas del distrito 1 del municipio de Sucre, con el objetivo de reducir la contaminación por residuos plásticos y promover su aprovechamiento bajo un enfoque de economía circular, como alternativa sostenible en construcciones civiles.

Se realizó una revisión bibliográfica y normativa sobre el uso de plásticos en materiales de construcción. Ante la ausencia de una normativa boliviana específica para ladrillos ecológicos, el estudio se sustentó en la Ley N° 755 y las Normas Bolivianas NB 1211002, NB 1211003 y NB 1223001.

Los residuos plásticos fueron clasificados y caracterizados, identificándose principalmente el PET, HDPE y PP. A partir de estos materiales se diseñaron tres dosificaciones experimentales para la elaboración de prototipos, considerando criterios de resistencia, durabilidad y viabilidad técnica.

Los ladrillos obtenidos fueron sometidos a ensayos físico mecánicos de absorción de agua, resistencia a la compresión y flexión, cuyos resultados evidenciaron el cumplimiento de los parámetros normativos de referencia. Asimismo, se realizó un análisis de costos que permitió estimar un precio unitario aproximado de 5 Bs., demostrando la viabilidad económica del proceso a escala piloto.

En conclusión, los resultados confirman que los plásticos reciclables pueden transformarse en ladrillos ecológicos funcionales, constituyendo una alternativa técnica y ambientalmente viable para la construcción.

Palabras clave: Construcción sostenible; ensayos físico mecánicos; economía circular

Abstract

This study examines the production of eco-bricks using recyclable plastics collected during campaigns conducted with schools in District 1 of the municipality of Sucre, with the aim of reducing plastic waste pollution and promoting its reuse within a circular economy framework as a sustainable alternative in civil construction.

A literature and regulatory review was conducted on the use of plastics in construction materials. In the absence of specific Bolivian regulations for eco-friendly bricks, the study was based on Law No. 755 and Bolivian Standards NB 1211002, NB 1211003, and NB 1223001.

The plastic waste was classified and characterized, with PET, HDPE, and PP being the primary materials identified. Based on these materials, three experimental formulations were designed for the production of prototypes, taking into account criteria of strength, durability, and technical feasibility.

The bricks obtained were subjected to physical-mechanical tests for water absorption, compressive strength, and flexural strength, the results of which demonstrated compliance with the relevant regulatory standards. Additionally, a cost analysis was conducted, estimating an approximate unit price of 5 Bs., thereby demonstrating the economic viability of the process at the pilot scale.

In conclusion, the results confirm that recyclable plastics can be transformed into functional eco-friendly bricks, offering a technically and environmentally viable alternative for construction.

Keywords: Sustainable construction; physical mechanical tests; circular economy.

Citación: Vilacagua J. (2025). Fabricación de ladrillos ecológicos con plásticos reciclables como alternativa sostenible en construcciones civiles, *Revista Ingeniería Sostenible Ambiental*, 2(5), 171-178

Introducción

El plástico se ha consolidado como uno de los materiales de mayor producción y consumo a nivel mundial debido a su versatilidad, bajo costo y propiedades físico químicas favorables. No obstante, el incremento sostenido en su fabricación ha generado una problemática ambiental significativa, ya que gran parte de los residuos plásticos no se reciclan y terminan acumulándose en rellenos sanitarios o ecosistemas naturales, donde pueden persistir durante siglos (Geyer, Jambeck, & Law, 2017). Esta situación representa un desafío crítico para el desarrollo sostenible y la gestión integral de residuos sólidos.

En América Latina, las limitaciones en los sistemas de gestión de residuos han agravado la acumulación de desechos plásticos, especialmente aquellos derivados del consumo masivo, como el tereftalato de polietileno (PET), ampliamente utilizado en envases de bebidas (Lebreton & Andrady, 2019). Frente a este escenario, la economía circular se posiciona como un modelo estratégico que promueve la valorización de residuos mediante su reincorporación en nuevos procesos productivos, reduciendo la extracción de materias primas y los impactos ambientales asociados (Geissdoerfer, Savaget, Bocken, & Hultink, 2017).

En el sector de la construcción, diversas investigaciones han demostrado que la incorporación de plásticos reciclables en materiales constructivos puede generar productos con propiedades mecánicas adecuadas, menor peso y potencial reducción de costos, manteniendo niveles aceptables de desempeño estructural (Awoyera & Adesina, 2020). En este contexto, los ladrillos ecológicos se definen como unidades constructivas cuya fabricación emplea materiales alternativos o reciclados con el objetivo de disminuir el impacto ambiental en comparación con los ladrillos tradicionales.

En Bolivia, y particularmente en el municipio de Sucre, la disposición inadecuada de residuos plásticos constituye una problemática ambiental relevante. Sin embargo, aún existe limitada investigación aplicada sobre la fabricación y evaluación técnica de ladrillos ecológicos elaborados con plásticos reciclables en el contexto local, así como ausencia de normativa específica que regule su producción.

El presente estudio tiene como objetivo desarrollar y evaluar la fabricación de ladrillos ecológicos a partir de plásticos reciclables recolectados en campañas con unidades educativas del distrito 1 del municipio de Sucre, analizando su desempeño físico mecánico y su viabilidad técnica y económica, con el fin de proponer una alternativa sostenible para su aplicación en construcciones civiles bajo un enfoque de economía circular.

Materiales y métodos

La recolección de los residuos plásticos se hizo con las unidades educativas del distrito 1 del municipio de Sucre, en coordinación con el Gobierno Autónomo Municipal de Sucre. Se llegaron al recolectar tres tipos de plásticos; 299 kg de Polietileno de Tereftalato (PET), 75 kg de Polietileno de Alta Densidad (HDPE) y 51 kg de Polipropileno (PP).

Las unidades educativas participantes del distrito 1 fueron nueve, iniciando el proceso de recolección de materiales reciclables, designando espacios adecuados dentro de sus instalaciones para el almacenamiento temporal del material.

Agregados

Arena: No se le realizó estudios granulométricos en un laboratorio, ya que se utilizó arena prelavada cernida, libre de piedras de tamaños considerables y residuos orgánicos, de este modo se verificó que cumpla con dichos requisitos para que no afecte el rendimiento de la máquina fundidora.

En lo económico, tiene un costo accesible y relativamente bajo debido a la gran oferta para las construcciones civiles. El uso de la arena en la elaboración de los ladrillos ecológicos, irá mezclado de manera uniforme con el ocre. Para las tres dosificaciones se utilizó un total de 10 kg.

Ocre: Se utilizó el ocre comercial, para esto se verificó que sea un polvo fino, que tenga un color rojizo y sea soluble al agua, ya que el uso de este material fue utilizado solo para darle color y estética a los ladrillos ecológicos. Se mezcla de manera homogénea con la arena antes de introducir a la máquina fundidora. Para las tres dosificaciones se utilizó un total de 1,25 kg.

Aceite reciclable comestible: No fue necesario llevar a cabo ensayos de laboratorio, sabemos que este producto tras ser utilizado en la cocción de alimentos, experimenta cambios en sus propiedades debido a la oxidación. Se verificó que sea aceite reciclable para su uso en la elaboración de los prototipos.

Este agregado al ser un líquido viscoso, se incorpora a la mezcla de materiales secos. Su consistencia aceitosa permite una mejor cohesión entre los componentes de la mezcla, evitando que se agrieten fácilmente durante el secado y curado. Para las tres dosificaciones se utilizó un total de 24 L.

Equipos

Planta picadora de plásticos: Perteneciente al Gobierno Autónomo Municipal de Sucre, comprende un grupo de maquinarias estáticas instaladas en serie, que logra cortar el plástico de un tamaño aproximado de 2 a 3 mm, teniendo un funcionamiento con cinco motores, sus características técnicas son las siguientes (Tabla 1):

Tabla 1. Características de la planta picadora de plásticos

Máquina	Funcionamiento
Banda alimentadora	✓ Es el equipo que recibe los plásticos seleccionados previamente por su tipo y clasificación. ✓ Realiza la alimentación del sistema de picado.
Picadora de plástico	✓ Tritura el plástico a través de dos ejes con cuchillas interconectadas para el proceso de trituración.
Alimentador de banda	✓ Es el equipo que recibe el plástico picado proveniente del sistema de trituración. ✓ Realiza la alimentación del sistema de lavado.
Equipo de lavado	✓ Realiza el lavado del plástico picado (pellets), eliminando contaminantes orgánicos.

Máquina fundidora de plásticos: Perteneciente al Gobierno Autónomo Municipal de Sucre, presenta las siguientes características técnicas:

- ✓ Tiene una capacidad máxima de peso de 20 kg.
- ✓ Capacidad de procesamiento continuo de 15 h.
- ✓ Eficiencia para el procesamiento completo de los materiales de un 99%.
- ✓ Tiempo estimado de enfriamiento del equipo de 30 min.
- ✓ Opera a una temperatura máxima de 250 °C.

La planta picadora y maquina fundidora de plásticos se encuentran instalados en los predios del Centro Municipal de Revisión Técnica Vehicular del G.A.M.S, ubicado en el barrio Sinaí, zona de Lajastambo del distrito 3. Dichos predios son supervisados y se encuentra a cargo de la Dirección de Medio Ambiente del G.A.M.S. cuenta con los servicios básicos y las condiciones aptas para la instalación y puesta en marcha de manera piloto de dichos equipos.

Dosificaciones

Dosificación 1: Corresponde a la primera mezcla basada en la dosificación de referencia, conformada por (3 kg de PET, 3 kg de HDPE, 3 kg de PP), 9 L de aceite reciclable, 2 kg de arena y 0,5 kg de ocre, alcanzando una cantidad total de 20,5 kg en la máquina fundidora. Busca lograr una adecuada fusión entre los plásticos y los agregados minerales, asegurando una buena cohesión y resistencia.

Dosificación 2: En esta mezcla se redujo ligeramente la proporción de plásticos (3 kg de PET, 2 kg de HDPE y 1 kg de PP) y se aumentó la cantidad de arena a 4 kg, mientras el aceite reciclable se disminuyó a 8 L. El ocre también se redujo a 0,25 kg, resultando en un total de 18,25 kg. Con esta variación se buscó analizar cómo la disminución de material plástico y el aumento de componente mineral afectan la densidad, rigidez y estabilidad dimensional del ladrillo.

Dosificación 3: Se disminuyó aún más el contenido total de plásticos (2 kg de PET, 2 kg de HDPE y 2 kg de PP) y de aceite reciclable a 7 L, manteniendo la arena en 4 kg y el ocre en 0,5 kg. Esta mezcla totaliza 17,5 kg en la máquina fundidora. El objetivo fue evaluar el comportamiento del ladrillo con menor carga plástica, observando su resistencia estructural, homogeneidad y posible incremento de absorción debido al mayor contenido mineral.

Es así que, una vez revisadas diferentes fuentes bibliográficas y considerando la capacidad máxima de proceso que tiene la máquina fundidora, se realizó la búsqueda experimental de una dosificación adecuada. En este caso, se decidió manipular dos variables independientes; el porcentaje en peso de plásticos y el porcentaje en peso de los demás materiales. La elección de estas dos variables responde a su influencia directa en las propiedades finales del ladrillo. El porcentaje de plásticos afecta la resistencia mecánica, la absorción de agua y la durabilidad del material, mientras que el porcentaje de los demás materiales incide en la cohesión, densidad y estabilidad dimensional del ladrillo. Modificar ambas variables de manera controlada permite identificar la combinación que optimiza las propiedades requeridas, cumpliendo tanto los límites permisibles que nos exige las normas bolivianas de referencia, como así también nuestras expectativas de desempeño.

Esta estrategia permite optimizar recursos, tiempo y materiales, ya que se enfoca en las combinaciones más representativas y relevantes para el proyecto.

De esta manera, se logra un análisis más claro y eficiente, que facilita la selección de la dosificación más óptima.

Elaboración de los prototipos del ladrillo ecológico

Triturado de los plásticos: Una vez recolectado por tipo y cantidad los plásticos reciclables, se procedió al triturado con la máquina picadora de plásticos. Primeramente, se hizo el triturado de las botellas PET y luego los envases de champú, detergentes y contenedores de residuos, las tapas de botellas no necesitaron ser trituradas, ya que tienen un tamaño aceptable para ser procesado. Es importante señalar que no fue necesario limpiar y lavar el plástico, ya que las impurezas que presentaron no impidieron que el producto final tenga inconsistencia.

Preparación y encendido de la máquina fundidora: Una vez encendido la máquina fundidora, se vierte el 75 % del aceite reciclable a la máquina, el cual tiene que calentar hasta llegar a una temperatura de 150 °C (normalmente tarda 30 minutos).

Incorporación y fundición del plástico: Una vez calentado el aceite reciclable a 150 °C, se introduce los diferentes tipos de plásticos picados a la máquina fundidora, donde se debe esperar 45 minutos para su mezcla homogénea y transformación.

Adición de arena y ocre: Antes de la adición de estos dos materiales al proceso, deben ser mezclados ambos hasta obtener una mezcla homogénea. Pasado el tiempo donde los plásticos se mezclaron, se añade la mezcla de la arena y el ocre. Seguidamente se añade el 25 % del aceite reciclable restante, para finalmente esperar 30 minutos para que el proceso se complete dentro de la máquina fundidora.

Moldeado: Una vez terminado el proceso de la mezcla completa de los materiales, se abre la llave de la máquina fundidora para que la mezcla final se vierta en los moldes, donde se obtendrá la forma final del prototipo del ladrillo ecológico.

Para la fabricación de los prototipos de los ladrillos ecológicos, se tiene 10 moldes, los mismos que fueron obtenidos como donación junto a la máquina fundidora de plásticos

por parte del Fondo Andaluz de Municipios para la Solidaridad Internacional (FAMSI) al Gobierno Autónomo Municipal de Sucre.

Aclarar en esta parte del proceso que, la máquina fundidora debe permanecer encendida hasta vaciar toda la mezcla a los moldes, para así evitar que la mezcla se enfríe y se pegue a las paredes de la máquina fundidora.

Enfriamiento: Después que la mezcla final sea vaciada a los moldes, estos se dejan enfriar para su solidificación por un tiempo no mayor a 10 minutos.

Desmolde: Una vez pasado el tiempo de enfriamiento y solidificación, el producto final se retira de los moldes para ser introducidos a un tanque de agua, donde obtendrán una mayor dureza y resistencia.

Secado: Pasado el proceso de elaboración de los ladrillos ecológicos, se procedió al secado, que tuvo una duración 10 días a temperatura ambiente. Con este último proceso de elaboración, el ladrillo adquirió sus propiedades mecánicas, listos para llevar a cabo los ensayos de laboratorio.

Ensayos de laboratorio

Absorción de agua: Esta primera prueba consiste en pesar una muestra seleccionada de cada dosificación, en este caso tres muestras secas, los cuales serán los pesos iniciales de las muestras. Posteriormente los ladrillos secos se sumergen completamente en agua, durante un periodo de 24 h, asegurando que toda la superficie del ladrillo esté en contacto con el agua. Los ladrillos se sumergen en agua para simular condiciones reales de humedad y evaluar su capacidad de absorción. Esto permite medir la porosidad del material y verificar su durabilidad e impermeabilidad.

Transcurrido el tiempo de inmersión, se retiran las muestras del agua y se dejan escurrir por un min, para proceder a realizar el pesaje de cada uno y determinar sus pesos finales

Resistencia a la compresión: Este segundo ensayo que se realizó en laboratorio, busca evaluar la resistencia de los ladrillos ecológicos, se utilizó el método de compresión y fatiga.

Este método consiste en someter los ladrillos a una carga constante en una máquina automática de compresión hasta que se alcance su punto de ruptura. Las pruebas iniciaron dándole la forma prismática cuadrangular a las muestras, ya que la norma lo exige así y, también para que el equipo automático de compresión realice un correcto ensayo aplicando una fuerza uniforme a las muestras y no se generen cálculos y datos erróneos.

Resistencia a la flexión: Llamado también módulo de rotura. Esta prueba se inicia sometiendo las muestras a la acción gradual de cargas en una máquina automática de pruebas a flexión, las cuales lo deforman hasta llegar a la falla o ruptura de dichas muestras. Es considerado una de las pruebas más importantes, pues los resultados determinarán si los ladrillos podrán resistir cargas suficientes para ser utilizado dentro en un proyecto de construcción civil.

Las pruebas iniciaron cortando por la mitad cada muestra, ya que la norma lo exige así y también para que el equipo automático de prueba de flexión realice un correcto ensayo aplicando un aumento de fuerza correcto a las muestras y no se generen cálculos y datos erróneos.

Resultados

Ensayo de Absorción de agua

Los resultados del ensayo de absorción de agua muestran que las tres dosificaciones evaluadas presentan valores significativamente inferiores a los límites establecidos por la Norma Boliviana NB 1223001 para elementos destinados a tráfico pesado, la cual exige una absorción promedio ≤ 5 % y una absorción individual ≤ 6 %.

La dosificación 1 registró una absorción de 1,2 %, la dosificación 2 de 2,2 % y la dosificación 3 de 3,0 %, evidenciando en todos los casos una muy baja capacidad de absorción de agua. Estos resultados indican una adecuada impermeabilidad del material, lo que se traduce en una mayor durabilidad frente a condiciones de humedad y una menor susceptibilidad al deterioro por acción del agua

Tabla 1. Resultados de los ensayos de absorción de agua

MUESTRAS			NB 1223001	
% DE ABSORCIÓN			Absorción Promedio (%)	Absorción Individual (%)
DOS 1	DOS 2	DOS 3	Tipo de tráfico	
1,2	2,2	3,0	Liviano y Peatonal	6
			Pesado	5
				7
				6

Ensayo de resistencia a la compresión

En cuanto a la resistencia a la compresión, los valores obtenidos para las tres dosificaciones superan ampliamente el valor mínimo exigido por la Norma Boliviana NB 1211003 para elementos clasificados como Clase A, cuyo límite es $\geq 20,0$ MPa, destinados a condiciones de servicio muy rigurosas.

La dosificación 1 alcanzó una resistencia de 29,7 MPa, la dosificación 2 presentó el valor más alto con 36,4 MPa y la dosificación 3 obtuvo 31,7 MPa. Estos resultados evidencian una elevada dureza y capacidad portante de los ladrillos ecológicos, siendo la dosificación 2 la que presenta el mejor desempeño mecánico. Este comportamiento sugiere una óptima interacción entre los plásticos reciclados y los agregados, permitiendo una adecuada transferencia de esfuerzos y consolidación del material, lo que la posiciona como la dosificación que más se aproxima a la condición deseada para aplicaciones estructurales exigentes

Tabla 2. Resultados de las pruebas de compresión

MUESTRAS			PARAMETROS NB 1211002	
Resistencia a la Compresión (MPa)			Clase	Resistencia Mínima a la Compresión (MPa)
DOS 1	DOS 2	DOS 3		
29,7	36,4	31,7	A	20,0
-	-	-	B	12,0
-	-	-	C	4,0
-	-	-	D	1,5

Ensayo de resistencia a la flexión

Los resultados del ensayo de resistencia a la flexión también cumplen con los parámetros establecidos por la Norma Boliviana NB 1223001 para elementos sometidos a tráfico pesado, la cual establece un valor promedio $\geq 5,0$ MPa y un valor individual $\geq 4,5$ MPa.

La dosificación 1 alcanzó un valor de 6,3 MPa, la dosificación 2 de 7,9 MPa y la dosificación 3 de 6,6 MPa, superando en todos los casos los límites normativos. La mayor resistencia a la flexión observada en la dosificación 2 confirma su mayor capacidad para soportar esfuerzos de tracción indirecta y deformaciones sin presentar fisuración, lo que resulta fundamental para elementos expuestos a cargas dinámicas y repetitivas.

Tabla 3. Resultados de los ensayos a la resistencia a flexión

MUESTRAS			PARAMETROS NB 1223001		
Resistencia a la Flexión (MPa)			Tipo de Tráfico	Valor Promedio (MPa)	Valor Individual (MPa)
DOS 1	DOS 2	DOS 3			
-	-	-	Liviano y Peatonal	4,5	3,6
6,3	7,9	6,6	Pesado	5,0	4,5

Discusión

Los resultados obtenidos demuestran que los ladrillos ecológicos desarrollados presentan un desempeño superior respecto a investigaciones previas realizadas en Bolivia y frente a productos tradicionales disponibles en el mercado. En términos de peso, los ladrillos alcanzaron un promedio de 1,13 kg, lo que representa una reducción superior al 60 % en comparación con los 3,10 kg reportados por Gareca et al. (2020), y son considerablemente más livianos que los ladrillos macizos de INCERPAZ (2,04 kg), los adoquines de PRECONAL (3,08 kg) y los de PREFORTE (2,5 kg). Esta disminución de masa facilita el transporte y la manipulación sin comprometer la integridad estructural.

La diferencia significativa observada se atribuye principalmente al uso de plástico reciclable como material aglutinante, en contraste con el empleo de cemento en otros proyectos. Esta sustitución reduce de manera notable la masa del producto sin afectar sus propiedades mecánicas.

En cuanto a la absorción de agua, los ladrillos ecológicos presentaron valores inferiores a los reportados por Gareca et al. (2020) (10,27 %) y Girona & Reyes (2022) (8,1 %), lo que evidencia una mayor impermeabilidad y, por ende, una mejor resistencia frente a procesos de degradación por humedad.

Respecto a la resistencia mecánica, los ladrillos ecológicos alcanzaron una resistencia a compresión promedio de 32,60 MPa, superando ampliamente los valores de los adoquines de PRECONAL (22 MPa) y PREFORTE (21 MPa). Asimismo, la resistencia a flexión fue de 6,9 MPa, frente a los 3,6 MPa de PRECONAL, lo que refleja una adecuada cohesión interna y elevada durabilidad.

De manera global, los ensayos de absorción, compresión y flexión confirmaron que las tres dosificaciones cumplen con las Normas Bolivianas de referencia. Sin embargo, la dosificación 2 se destacó por lograr el mejor equilibrio entre baja absorción de agua, alta resistencia a la compresión y elevada resistencia a la flexión, además de no afectar el rendimiento de la máquina fundidora durante el proceso de fabricación.

En consecuencia, se concluye que la dosificación 2 se aproxima con mayor precisión a la formulación óptima, siendo técnica y económicamente viable para su aplicación en construcciones civiles dentro del municipio de Sucre.

Conclusiones

La revisión bibliográfica y normativa evidenció la ausencia de una regulación específica en Bolivia para la fabricación de ladrillos ecológicos a base de plásticos reciclables.

Ante esta limitación, el proyecto se sustentó en la Ley N° 755 y en las Normas Bolivianas NB 1211002, NB 1211003 y NB 1223001, que sirvieron como marco de referencia para el diseño, desarrollo y evaluación del producto final.

La recolección, clasificación y caracterización de residuos plásticos PET, HDPE y PP provenientes de campañas realizadas en unidades educativas del distrito 1 permitió disponer de materia prima en condiciones técnicas adecuadas, demostrando la factibilidad de su aprovechamiento en la fabricación de ladrillos ecológicos.

Los ensayos experimentales confirmaron que la dosificación de materiales influye directamente en el desempeño operativo de la máquina fundidora y en la calidad del producto final. Se determinó que el control del peso total de la mezcla y del tiempo de secado es fundamental para obtener ladrillos homogéneos, resistentes y libres de fisuras.

Los resultados de laboratorio mostraron que los ladrillos ecológicos presentan baja absorción de agua y valores adecuados de resistencia a la compresión y flexión, cumpliendo con los parámetros establecidos en las Normas Bolivianas NB 1211003 y NB 1223001. Entre las formulaciones evaluadas, la dosificación 2 destacó por su mejor desempeño físico-mecánico y operativo, siendo la más adecuada para aplicaciones en construcciones civiles en el municipio de Sucre.

En síntesis, este estudio permitió desarrollar una propuesta técnica de fabricación de ladrillos ecológicos a partir de plásticos reciclables, en concordancia con la normativa vigente de referencia. Los resultados demuestran que esta alternativa contribuye a la reducción de residuos plásticos y constituye una opción ambientalmente sostenible y técnicamente viable para la construcción, alineada con los principios de economía circular y gestión integral de residuos.

Referencias

- Awoyera, P., & Adesina, A. (2020, junio). Plastic wastes to construction products: Status, limitations and future perspective. *Case Studies in Construction Materials*, 12, e00330.
<https://doi.org/10.1016/j.cscm.2020.e00330>
- Dirección de Medio Ambiente - GAMS. (2025). *Campañas de Recolección de Plásticos*. Sucre: Gobierno Autónomo Municipal de Sucre.
- ECOERDE. (2024). *PLANTA PICADORA DE RESIDUOS PLÁSTICOS*. Sucre: ECOERDE - Consultora Constructora.
- Gareca et. al. (2020). Nuevo material sustentable: Ladrillos ecológicos a base de residuos inorgánicos. *Revista Ciencia, Tecnología e Innovación*, 25-61.
- Geissdoerfer, M., Savaget, P., Bocken, N., & Hultink, E. (1 de Febrero de 2017). The Circular Economy – A new sustainability paradigm? *Journal of Cleaner Production*, 143, 757-768. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.12.048>
- Geyer, R., Jambeck, J., & Law, K. (2017). Production, use, and fate of all plastics ever made. *Science Advances*, 3(7). doi:10.1126/sciadv.1700782
- Gironda, M., & Reyes, M. (2022). Evaluación de producción de ladrillos ecológicos a base de plástico reciclado como alternativa para la construcción de viviendas en la ciudad de Sucre. Sucre: Universidad Mayor Real y Pontificia de San Francisco Xavier de Chuquisaca.
- Instituto Boliviano de Normalización y Calidad (IBNORCA). (2013). Norma Boliviana NB 1211003: Ladrillos cerámicos – Ladrillos macizos – Clasificación y requisitos. La Paz: IBNORCA
- Instituto Boliviano de Normalización y Calidad (IBNORCA). (2013). Norma Boliviana NB 1211001: Ladrillos cerámicos – Ladrillos huecos – Clasificación y requisitos. La Paz: IBNORCA.
- Lebreton, L., & Andrady, A. (2019). Future scenarios of global plastic waste generation and disposal. *Palgrave Communications*, 5(1). doi: [10.1057/s41599-018-0212-7](https://doi.org/10.1057/s41599-018-0212-7)
- Leopold, Clarke, Hanshaw, & Balsley, &. (1971). *Procedure for Evaluating Environmental Impact (Circular 645)*. Washington D.C.: U.S. Geological Survey - U.S. Department of the Interior.
- Palma María. (2014). Mezclas de Cemento y Agregados de Plástico para la Construcción de Viviendas Ecológicas. *Ciencias Tecnológicas y Agrarias T-I*, 101-110.

INSTRUCCIONES PARA AUTORES

Los investigadores interesados deben tener en cuenta lo siguiente:

- Los proyectos deben ser originales y no estar bajo revisión en ninguna otra publicación.
- Se aceptarán proyectos escritos en español.
- Los proyectos deben seguir las normas de formato y estilo establecidas por la revista (Asentamiento bibliográfico APA – séptima edición)

Proceso de presentación:

Los investigadores deben enviar sus trabajos de investigación a través del correo institucional de la Carrera de Ingeniería Ambiental revista.ambiental@usfx.bo en el caso de los profesionales de ingeniería ambiental que han presentado proyecto de grado o trabajo dirigido, pueden escribir un artículo científico de su trabajo, los proyectos se deben presentar en formato WORD y deben incluir:

- **TÍTULO:**

El título del proyecto debe ser conciso e informativo, con una extensión máxima de 15 palabras y debe estar escrito en letras minúsculas, sin incluir abreviaciones.

- **AUTOR (ES) Y AFILIACIÓN:**

Deben figurar los nombres completos de los autores, en el orden de importancia de su contribución a la investigación. Se permite un mínimo de un autor y un máximo de cinco. Junto a los nombres de los autores, se debe indicar la institución de afiliación, en este caso, "Universidad San Francisco Xavier de Chuquisaca".

- **RESUMEN (en párrafos sin subtítulos):**

El resumen debe describir de manera clara y concisa todos los aspectos esenciales de la investigación y debe estar estructurado en párrafos sin subtítulos. Deberá incluir información sobre el propósito del estudio o investigación, los procedimientos básicos utilizados, los resultados relevantes con especificaciones de datos y significancia estadística, así como las principales conclusiones. El resumen no debe contener referencias bibliográficas y su extensión no debe superar las 200 palabras. También se deben incluir palabras clave.

- **PALABRAS CLAVE:**

Se deben proporcionar entre tres y cinco palabras clave que identifiquen las principales temáticas de la investigación.

- **ABSTRACT AND KEY WORDS:**

Deberá incluirse la traducción del resumen y las palabras clave del idioma inglés. Se recomienda evitar el uso de software traductor para la traducción, ya que puede generar incoherencias en el texto.

- **FORMATO DEL ARTÍCULO CIENTÍFICO:**

A continuación, se describen las secciones que debe contener el artículo científico:

- a) Introducción:** En esta sección, se debe proporcionar información adecuadamente redactada y contextualizada para guiar al lector hacia la pregunta o hipótesis de investigación. Cada oración, excepto las redactadas originalmente por el autor, debe llevar las correspondientes citas bibliográficas siguiendo el formato de asentamiento bibliográfico APA (séptima edición). En caso de citar múltiples referencias al final de una frase, estas deben ordenarse por año de publicación, desde la más antigua hasta la más reciente.
- b) Materiales y métodos:** En esta sección, se deben describir de manera concisa y clara, los materiales utilizados y centrarse en describir específicamente los métodos empleados. Debe evitarse la inclusión de descripciones poco claras o generales de las metodologías. Se debe respaldar el uso de las metodologías a través de literatura que las haya validado previamente, a menos que se trate de metodologías originales generadas durante la investigación. También se debe describir claramente los tipos de análisis, variables de respuesta e independientes, el tipo de diseño (experimental u observacional), tamaño de la muestra y métodos estadísticos utilizados.
- c) Resultados:** Esta sección debe describir los resultados relevantes en un orden similar al utilizado en la descripción de la metodología. Si se han utilizado herramientas estadísticas, se deben incluir los parámetros estadísticos apropiados de cada prueba aplicada.
- d) Discusión:** En esta sección, se deben discutir los resultados más destacados en relación con investigaciones previas que respalden o, en su caso, contradigan los hallazgos de la investigación. Debe evitarse la especulación y respaldar las afirmaciones con referencias bibliográficas. Generalmente, el último párrafo de la discusión se utiliza para incluir conclusiones y sugerencias relacionadas con el trabajo.
- e) Conclusiones:** Esta sección debe enfatizar los aspectos nuevos e importantes del estudio y las conclusiones deben relacionarse con los objetivos de la investigación. Debe evitarse la repetición de datos ya presentados en secciones anteriores.
- f) Agradecimientos (opcional):** En esta sección, los autores pueden expresar su agradecimiento a aquellos que hayan brindado apoyo logístico, financiero o académico a la investigación.
- g) Referencias:** Deben coincidir con las citas utilizadas en el artículo, siguiendo la norma APA (séptima edición). El número de referencias no debe exceder las 30 y deben ser de los últimos 5 años.
- h) Tablas y figuras:** Las tablas y figuras deben ser auto explicativas y contar con un índice que incluya la leyenda de la información proporcionada, el significado de las abreviaciones o acrónimos, y en algunos casos, la descripción de patrones destacados. Se recomienda que las figuras sean monocromáticas y generadas en programas adecuados para la publicación. Las tablas pueden ser generadas en programas como Word. Se debe evitar el uso de colores que dificulten la lectura en las figuras.
- i) Anexo I:** En este anexo, los autores pueden incluir material de apoyo necesario para la comprensión de su investigación, como fotografías o scripts.
- j) Anexo II:** Este anexo debe contener el formulario de registro del proyecto y copias de los documentos de identidad de los investigadores.

k) Cantidad de páginas, debe estar entre 8 a 12 páginas, incluida bibliografía

Siguiendo estas pautas, los autores podrán presentar sus proyectos de manera clara y organizada, lo que facilitará la revisión y evaluación por parte del comité de revisión de la revista científica.

Evaluación y selección:

Todos los proyectos serán sometidos a un proceso de revisión por pares, en el que expertos en el campo evaluarán la calidad, la originalidad y la relevancia. Los autores serán notificados sobre los resultados de la revisión, en caso de aceptación, recibirán orientación para la preparación final del artículo.

Comité arbitral

La revista cuenta con un comité arbitral conformado por expertos en las áreas mencionadas, provenientes de universidades nacionales e internacionales. Estos evaluadores realizarán una revisión imparcial y rigurosa de los artículos presentados, para garantizar la calidad, pertinencia y relevancia de los mismos.

Proceso de revisión por pares

Todos los proyectos presentados serán sometidos a un proceso de revisión por pares, donde expertos en el campo evaluarán la calidad, originalidad y relevancia de los proyectos. Este proceso es esencial para garantizar la excelencia científica de la revista.

Comunicación de resultados

Todos los investigadores recibirán una notificación sobre los resultados de la revisión a sus correos electrónicos. Los proyectos pueden ser aceptados, rechazados o requerir revisiones adicionales. Se proporcionará retroalimentación constructiva en caso de rechazo o necesidad de revisión.

Preparación para la publicación

Los autores de proyectos aceptados trabajarán en colaboración con el equipo editorial de la revista para asegurar que sus proyectos cumplan con los requisitos de formato y contenido de la revista.

Publicación y difusión

Los trabajos seleccionados serán publicados en la revista Ingeniería Sostenible Ambiental de la Universidad San Francisco Xavier (USFX). Esta publicación cuenta con ISSN tanto en formato digital como impreso, y está disponible en la plataforma oficial de la universidad. La revista se distribuye ampliamente en las comunidades académica y científica a nivel local, nacional e internacional, contribuyendo significativamente al avance y la difusión del conocimiento en el campo de la ingeniería ambiental.

Transparencia en el Proceso

La prioridad de la revista es mantener un proceso de revisión y selección transparente y justo. Los investigadores pueden confiar en que sus proyectos serán evaluados de manera imparcial y recibirán comentarios constructivos para mejorar la calidad de sus investigaciones.

Cualquier información adicional será suministrada por el correo electrónico revista.ambiental@usfx.bo
Mayores referencias: página web: <https://revistas.usfx.bo/index.php/ingsostenibleambiental>